

**OXIDACIÓN DEL EFLUENTE DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL PARA
REUSO EN AGRICULTURA**

**TRABAJO DE GRADO
OPCIÓN AUXILIAR DE INVESTIGACIÓN**

CATALINA MORALES RODRIGUEZ

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA, FEBRERO 2007**

**OXIDACIÓN DEL EFLUENTE DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL PARA
REUSO EN AGRICULTURA**

CATALINA MORALES RODRIGUEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de Ingeniera Civil.**

**Director: Ing. Tatiana Rodríguez Chaparro MSc.
Tutor: Ing. Diana Lucía Cristancho.**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA, FEBRERO 2007**

A mi padre por su constante apoyo, esfuerzo y consejo, a mi madre por su incondicional compañía y energía. A Karina por pensar siempre en mi bienestar, a Vanessa por su alegría constante. A Ángela María y a Ángela Rocío por su amistad absoluta, a Héctor Adolfo por brindarme confianza y soporte. A mis amigos que están lejos pero siempre añorando el mismo sueño. A Catalina por su ayuda y protección. Y a todos aquellos que me enseñaron lo más importante de la vida para poder alcanzar mis ideales.

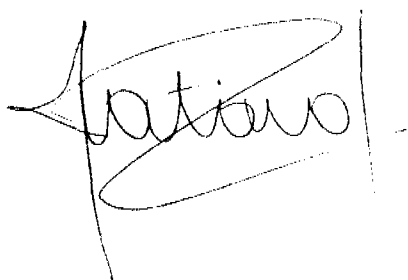
AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento:

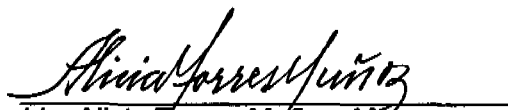
- A la Ing. Tatiana Rodríguez Chaparro directora de éste proyecto.
- A la Ing. Diana Cristancho, tutora de éste proyecto.
- A Jesús Ramos, encargado del Laboratorio de Calidad de Aguas de la Universidad.
- A la Lic. Alicia Torres Muñoz, metodóloga asesora.
- A las directivas de la Universidad Militar Nueva Granada.

APROBACIÓN

El informe final realizado como opción de auxiliar de investigación titulado "OXIDACIÓN DEL EFLUENTE DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL CON FINES DE REUSO EN AGRICULTURA", presentado por la estudiante Catalina Morales Rodríguez en cumplimiento de los requisitos para optar al título de Ingeniera Civil fue aprobado.



Ing. Tatiana Rodríguez Chaparro. MSc.
Directora Trabajo de Grado.



Lic. Alicia Torres Muñoz. Mag.
Metodóloga Asesora.



Ing. Diana Lucía Cristancho
Tutora Trabajo de Grado.

Bogotá, Febrero 19 de 2007

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
1. EL PROBLEMA	14
1.1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN	15
1.2. ANTECEDENTES.....	16
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	18
1.4. OBJETIVOS	19
1.4.1. Objetivo General.....	19
1.4.2. Objetivos específicos.....	19
1.5. ALCANCE.....	20
1.6. HIPÓTESIS	20
1.7. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	21
1.8. EVALUACIÓN DEL PROBLEMA	22
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	23
2.1. HUMEDALES ARTIFICIALES.....	23
2.1.1. Vegetación.....	24
2.1.2. Tipos De Humedales	25
2.1.3. Humedales Artificiales De Flujo Vertical	26
2.2. OXIDANTE QUÍMICOS	29
2.2.1. Desarrollo de las técnicas Oxidativas	29
2.2.2. Métodos de Oxidación	30
2.2.3. Cinética de la Desinfección.....	32
2.2.4. Desinfección por Cloro	34
2.2.5. Características que influyen en el Proceso de Desinfección.	35
2.3. REUSO DE AGUAS	36
2.3.1. Desarrollo del reuso de aguas	36
2.3.3. Calidad del agua para reuso.....	38
2.3.4. Estándares de la Calidad del Agua.....	39

3.	DISEÑO METODOLÓGICO	41
3.1	DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ACTUAL	41
3.2	CARACTERIZACIÓN Y ENSAYOS DE LABORATORIO.....	43
3.2.1.	Ensayos Realizados	43
3.2.2.	Elección Técnica Oxidativa.....	45
3.2.3.	Aplicación de NaOCl Hipoclorito de Sodio	46
3.3.	MUESTREO	48
4.	RESULTADOS	49
4.1.	RESULTADOS FASE I: TRATAMIENTO HUMEDAL ARTIFICIAL.....	52
4.1.1	Parámetros Físicos.....	52
4.1.2	Parámetros Químicos	57
4.1.3	Parámetros Microbiológicos.....	64
4.2.	RESULTADOS FASE II: TRATAMIENTO CON HIPOCLORITO DE SODIO.....	65
4.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	74
4.3.1.	FASE I: Tratamiento por medio del Humedal Artificial de Flujo Vertical	74
4.3.2.	FASE II: Tratamiento por medio de la Aplicación de Hipoclorito de Sodio	77
4.3.3.	Fase de Reuso	89
	CONCLUSIONES	93
	RECOMENDACIONES.....	95
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
	APÉNDICE	98

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Aplicación Hipoclorito de Sodio.....	47
Tabla 2. Datos obtenidos para el efluente y el afluente del Humedal Artificial de Flujo Vertical.....	51
Tabla 3. Valores obtenidos en la determinación de Sólidos Totales.....	52
Tabla 4. Valores obtenidos en la determinación de Conductividad.....	53
Tabla 5. Valores obtenidos en la determinación de Turbiedad.....	54
Tabla 6. Valores obtenidos en la determinación de Temperatura.....	55
Tabla 7. Valores obtenidos en la determinación de pH.....	56
Tabla 8. Valores obtenidos en la determinación de Dureza Total.....	57
Tabla 9. Valores obtenidos en la determinación de Acidez.....	58
Tabla 10. Valores obtenidos en la determinación de Alcalinidad.....	59
Tabla 11. Valores obtenidos en la determinación de Fósforo.....	60
Tabla 12. Valores obtenidos en la determinación de Cloruros.....	61
Tabla 13. Valores obtenidos en la determinación de DBO5.....	62
Tabla 14. Valores obtenidos en la determinación de DQO.....	63
Tabla 15. Valores obtenidos en la determinación de Coliformes Fecales.....	64
Tabla 16. Datos obtenidos para dosis de 1 mg/l de NaOCl.....	65
Tabla 17. Datos obtenidos para dosis de 2 mg/l de NaOCl.....	65
Tabla 18. Datos obtenidos para dosis de 4mg/l de NaOCl.....	66
Tabla 19. Datos obtenidos para dosis de 6 mg/l de NaOCl.....	66
Tabla 20. Datos obtenidos para dosis de 8 mg/l de NaOCl.....	67
Tabla 21. Valores obtenidos de pH por dosis.....	68
Tabla 22. Valores obtenidos de Temperatura por dosis.....	69
Tabla 23. Valores obtenidos de fósforo PO4 por dosis.....	70
Tabla 24. Valores obtenidos de Conductividad por dosis.....	71
Tabla 25. Valores obtenidos del Cloro total por dosis.....	72
Tabla 26. Valores obtenidos de Coliformes Fecales por dosis.....	73
Tabla 27. Valores obtenidos de $\ln(N/N_0)$ para cada dosis según mod. de Chick.....	78

Tabla 28. Valores de las constantes de decaimiento obtenidas por regresión para el modelo de Chick	79
Tabla 29. Valores obtenidos de Log (N/No) calculados por dosis y tiempos.....	80
Tabla 30. Valores obtenidos de Log (N/No) ajustados por dosis y tiempos, según Modelo de Chick.....	80
Tabla 31. Resultados regresión para obtener las variables del Modelo de Watson.....	82
Tabla 32. Valores obtenidos de Log (N/No) calculados por dosis y tiempos.....	83
Tabla 33. Valores obtenidos de Log (N/No) ajustados por dosis y tiempos, según Modelo de Watson.....	83
Tabla 34. Resultados regresión para obtener las variables del Modelo de Hom.....	85
Tabla 35. Valores obtenidos de Log (N/No) calculados por dosis y tiempos.....	86
Tabla 36. Valores obtenidos de Log (N/No) ajustados por dosis y tiempos, según Modelo de Hom.....	86
Tabla 37. Valores de Eficiencia para cada dosis y tiempo de contacto.....	88
Tabla 38. Cálculo eficiencias para el Modelo de Hom.....	89
Tabla 39. Valores Tabla de conversión de la Conductividad eléctrica a contenido de Sales.....	90
Tabla 38. Comparación valores guía con valores obtenidos.....	92

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales.....	27
Cuadro 2. Características Humedal Artificial construido.....	41
Cuadro 3. Lista ensayos de laboratorio y normas correspondientes.....	43
Cuadro 4. Ensayos Fase I.....	44
Cuadro 5. Ensayos Fase II.....	44
Cuadro 6. Descripción oxidantes físicos y químicos.....	46

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Humedal de flujo vertical.....	26
Figura 2. Procesos de desinfección.....	31
Figura 3. Estado actual humedal Artificial construido.....	42
Figura 4. Bikers para realización de mezclas.....	48
Figura 5. Controlador de mezcla	48
Figura 6. Agua del pozo séptico y agua del efluente del Humedal Artificial.....	49
Figura 7. Comportamiento de los Sólidos Totales.....	52
Figura 8. Comportamiento Conductividad.....	53
Figura 9. Comportamiento Turbiedad.....	54
Figura 10. Comportamiento Temperatura.....	55
Figura 11. Comportamiento Ph.....	56
Figura 12. Comportamiento Dureza.....	57
Figura 13. Comportamiento Acidez.....	58
Figura 14. Comportamiento Alcalinidad.....	59
Figura 15. Comportamiento Fósforo PO ₄	60
Figura 16. Comportamiento Cloruros.....	61
Figura 17. Comportamiento DBO.....	62
Figura 18. Comportamiento DQO.....	63
Figura 19. Comportamiento Coliformes Fecales.....	64
Figura 20. Variación del pH para varias dosis.....	68
Figura 21. Variación de la temperatura para varias dosis.....	69
Figura 22. Variación del fósforo PO ₄ para varias dosis.....	70
Figura 23. Variación de la conductividad para varias dosis.....	71
Figura 24. Variación del Cloro total para varias dosis.....	71
Figura 25. Variación de Coliformes fecales para varias dosis.....	73
Figura 26. Relación Ln(N/No) vs. Tiempo de contacto.....	78

Figura 27. Relación $\text{Log}(N/N_0)$ en función del tiempo para datos calculados y datos ajustados según Modelo de Chick.....	81
Figura 28. Relación $\text{Log}(N/N_0)$ en función del tiempo para datos calculados y datos ajustados según Modelo de Watson.....	84
Figura 29. Relación $\text{Log}(N/N_0)$ en función del tiempo para datos calculados y datos ajustados según Modelo de Hom.....	87

INTRODUCCIÓN

Debido al incremento continuo en la generación de aguas residuales en nuestra población, la ingeniería se ha visto obligada a la búsqueda y aplicación de alternativas eficientes y económicas de tratamiento. Esto por medio de diferentes técnicas que logran el objetivo primordial de reducción de contaminantes que permitan además pensar en el posible reuso del recurso en actividades no vitales que lo permitan.

Por medio de ésta investigación se propone un sistema completo de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico provenientes del edificio C de la Universidad Militar Nueva Granada. El sistema está compuesto por un proceso físico a través de un pozo séptico, un proceso biológico, por medio de un Humedal Artificial de Flujo Vertical, y un último proceso de tipo químico con la adición de un desinfectante denominado Hipoclorito de Sodio.

El tratamiento de este tipo de aguas busca principalmente y a largo plazo efectos positivos en las comunidades tales como la salud pública y el mejoramiento de la calidad del medio ambiente.

De tal manera, el objetivo principal de este trabajo busca analizar las condiciones más adecuadas y efectivas para la aplicación de un oxidante químico al agua residual con el propósito de encontrar una actividad apta para el reuso del efluente tratado, específicamente en la agricultura en donde ya se han tenido varias experiencias.

Esta investigación se proyectó para un tiempo de 360 horas de trabajo, como requisito para la opción de grado de Auxiliar de Investigación, según requerimientos del Programa de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar.

Para el desarrollo del trabajo propuesto se plantearon varias actividades para el trabajo a lo largo del tiempo antes mencionado. Estas actividades correspondieron a dos etapas generales, una es la recopilación de información básica y específica de los fundamentos teóricos y técnicos, y la segunda es el desarrollo experimental del mismo. La parte del desarrollo de prácticas de laboratorio se dividió en dos fases; la primera lo correspondiente al tratamiento por medio del Humedal Artificial de Flujo Vertical, y la segunda lo relacionado con la aplicación del oxidante químico. Posteriormente se realizó un análisis detallado de los datos recolectados y procesados para la evaluación final de la investigación.

El desarrollo del presente informe fue realizado de acuerdo con todas las Normas necesarias para la presentación de trabajos de grado o trabajos de investigación según el Instituto Colombiano de Normas Técnicas Colombianas ICONTEC. Adicionalmente cuenta con todos los requerimientos técnicos y parámetros mínimos dispuestos por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar.

A continuación se presenta el desarrollo de éste trabajo de grado denominado Oxidación del Efluente de un Humedal Artificial de Flujo Vertical con fines de Reuso en Agricultura.

1. EL PROBLEMA

Teniendo en cuenta que la sociedad moderna si bien aplica el principio fundamental del desarrollo sostenible: mantener el equilibrio entre el crecimiento económico pero conservando un ambiente sano y limpio, todavía se enfrenta a problemas fundamentales de saneamiento básico, entre los cuales se tiene el tratamiento de aguas residuales, domésticas e industriales; la ciencia y la ingeniería ofrecen alternativas novedosas en el tratamiento y disposición de estos efluentes, además resulta importante el cuidado del agua como recurso vital para todas las comunidades. A través del tiempo se han planteado diferentes sistemas de tratamiento de agua, muchos a gran escala, que resultan costosos aunque con mayor capacidad, por lo que se hace necesaria la utilización de nuevos sistemas, que posiblemente presentan ventajas técnicas y operativas sobre los convencionales, entre los cuales se pueden citar los Humedales Artificiales y como complemento la desinfección por medios físicos, químicos, o mecánicos, lo cuales permiten la destrucción selectiva de los organismos que causan enfermedades conocidos como organismos patógenos.

Adicionalmente, se tiene en cuenta que el agua potable es utilizada en la actualidad en actividades diferentes al consumo humano, que no exigen estándares de calidad similares al de potabilización, tal es el caso, del agua para lavar carros, regar jardines entre otras; por tal razón, se propone utilizar otro tipo de fuentes para usos diferentes al del consumo humano como es el caso de aguas residuales ya tratadas.

De acuerdo con lo anterior se plantea el problema de la siguiente manera:

¿La aplicación de un método oxidativo al efluente de un humedal artificial de flujo vertical permite reusar el agua residual en actividades de tipo agrícola?

1.1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN

Teniendo en cuenta que la salud pública es uno de los temas de interés sanitario de gran importancia en el mundo, se hace necesario el uso de técnicas de tratamiento de las aguas residuales de tipo doméstico e industrial, teniendo en cuenta el grado de contaminación que poseen, y los requerimientos de tipo económico que deben buscar entidades gubernamentales, científicos e ingenieros.

En este contexto, las técnicas de oxidación de aguas son métodos que permiten el tratamiento de aguas residuales de manera eficiente, pero teniendo en cuenta ciertos requisitos indispensables para su utilización. De tal manera, la presente investigación pretende realizar la aplicación de un método de oxidación química al efluente de un Humedal Artificial. Para realizar dicha aplicación, se operó un sistema compuesto por dos etapas básicas; la primera corresponde al pre-tratamiento que se realiza por medio del paso del agua por un humedal de flujo vertical construido para la remoción de sus contaminantes principales a través de procesos físico-químicos principalmente. Y la segunda etapa es la aplicación de un oxidante al afluente del humedal para remover los contaminantes aún presentes y especialmente los coliformes fecales como mecanismo indicador. El oxidante usado se denomina Hipoclorito de Sodio (NaOCl), y los ensayos a realizar consisten en la aplicación del oxidante en distintas dosis al agua tratada, y adicionalmente con distintos tiempos de mezcla.

El estudio consiste entonces en determinar los requerimientos mínimos para la aplicación y sus limitantes, en conocer los porcentajes de remoción de contaminantes. Todo esto para determinar las características más importantes de calidad del agua respecto a los requerimientos necesarios para el reuso de aguas en la agricultura.

1.2. ANTECEDENTES

El tratamiento de aguas residuales por medio de la aplicación de una técnica oxidativa, ha sido utilizado hace algún tiempo con resultados importantes de eficiencia. Algunos trabajos realizados buscan principalmente la investigación de metodologías y patrones de análisis, difusión y circulación de la información entre instituciones, y la creación de sociedades para la maximización de resultados¹. Todo esto permite a nuevos trabajos la comparación de procedimientos y metodologías de resultados importantes para el planteamiento de nuevos proyectos de acuerdo a las características y condiciones locales de cada caso.

Uno de éstos proyectos por ejemplo, es el trabajo que desarrolló la Red Cooperativa de Investigaciones para el tratamiento de aguas residuales del Brasil, para las comunidades menos favorecidas. Este consistió en la investigación del tratamiento y disposición controlada de técnicas de postratamientos de efluentes de reactores anaeróbios, a través de procesos de desinfección. Proceso descrito como la inactivación selectiva de organismos que amenazan la salud humana, de acuerdo con patrones de calidad establecidos. Dentro del proceso de desinfección, se menciona el uso del Cloro como el desinfectante de mayor difusión y el más económico respecto a otros. Adicionalmente se mencionan otros tales como la ozonización, la radiación ultravioleta, o las lagunas de estabilización.

Algunos datos hacen referencia a la reducción de coliformes fecales como parámetro indicador en pre-tratamientos tales como las lagunas de maduración, la infiltración lenta, los lodos activados entre otros, con valores hasta de 10^3 NMP/100m²l. Procedimientos que seguidos de la desinfección logran muchos mejores resultados de eficiencia.

¹ PROSAB. Red Cooperativa de Investigaciones. Brasil

² VON SPERLING & CHERNICHARO, 2002. Desinfección de efluentes sanitarios y remoción de organismos patógenos y sustancias nocivas, página 22.

Una investigación que utilizó Hipoclorito como desinfectante de un efluente sanitario permitió determinar que a pesar de la presencia de sólidos en suspensión y turbidez, los ensayos en una estación piloto prueban que el tiempo de detención usado, puede alcanzar bajas concentraciones de coliformes fecales ($<1\text{NMP}/100\text{ml}$) en cuatro horas de mezcla y con una dosis óptima de 13 mg/l. para efluentes de procesos de lagunas de estabilización, RSB y lodos activados.

Trabajos realizados por la Pontificia Universidad Católica de Paraná, desarrollaron un proceso de desinfección con valores óptimos de 4.9 mg/l de dosis, en un tiempo de detención hidráulico de 23.6 min., para lo que obtuvieron un porcentaje de remoción de E.Coli del 99.89%. Aunque valores altos de turbidez hicieron perder eficiencia al proceso de desinfección.

Souza 2000³, afirma que no siempre es necesario asumir que un residual de cloro elevado, pueda alcanzar un alto nivel de desinfección, es decir, algunas moléculas de cloro o de hipoclorito podrían realizar la inactivación de coliformes o patógenos.

Adicionalmente y por resultados obtenidos, se pudo determinar que la dosis de cloro aplicada debe ser del orden de 2mg/l con tiempos de contacto no menores a 15 minutos.

Por otro lado, respecto al reuso de aguas, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA afirma que las aguas residuales domésticas pueden considerarse no como un desecho, sino como un recurso valioso para su uso en la agricultura y servicios al público como riego de jardines, llenado de lagos, canales recreativos y fuentes de ornato. De tal manera desarrollaron un proyecto que tuvo por objetivo el de identificar la contaminación microbiológica

³ SOUZA. J.B. Desinfección de aguas con color y turbidez elevadas: Comparación técnica de procesos alternativos de cloro, utilizando radiación ultravioleta y ácido peracético.

residual en cultivos de hortalizas de raíz, hoja y fruto, regados con diferentes calidades de agua residual bajo condiciones de invernadero. Como conclusión se encontró que el agua tratada con desinfección química (cloración) y desinfección natural (laguna de maduración) cumplió con los límites de concentraciones de coliformes fecales presentados por las normas locales.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Debido al volumen creciente de residuos biológicos y químicos que entran en la red de aguas superficiales y a la demanda cada vez mayor de agua, resulta necesaria la búsqueda de mecanismos que permitan la depuración de estos contaminantes para suministrar así efectos positivos en las comunidades tales como la salud pública y el mejoramiento de la calidad del medio ambiente.

La oxidación de aguas residuales por métodos químicos se puede realizar mediante la aplicación de diversos métodos, que son accequibles de acuerdo con los recursos disponibles y también con la calidad del agua a tratar unas menos contaminadas que otras o viceversa. Para la utilización de técnicas oxidativas es importante el tratamiento preliminar del agua, que se logra por medio de un humedal artificial de flujo vertical. Este tipo de tratamiento resulta eficaz y económico dado que tiene componentes de gran importancia tales como son la presencia del lecho vegetal sumergido y un medio granular como elementos de retención de contaminantes, tienen el flujo oculto lo que evita la emisión de olores, el lecho de grava presenta mayores tasas de reacción y por lo tanto puede tener un área menor, además esta técnica no produce lodos, redundando en disminución de costos de tratamiento y disposición de los mismos.

Teniendo en cuenta que el pozo séptico del Edificio C de la Universidad Militar, necesita el tratamiento del agua que contiene y recibe diariamente, para verterla

luego a la Red de Alcantarillado en una forma mas limpia y de mejor calidad, se propone la oxidación del efluente por medio químico. Complementariamente se propone reusar el efluente tratado en riego agrícola.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

- Evaluar la aplicación de técnicas oxidativas en el efluente de un Humedal Artificial de flujo vertical, con el fin de mejorar su calidad con fines de reuso en agricultura.

1.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar la capacidad de reducción del Humedal Artificial de Flujo Vertical mediante análisis de parámetros físico-químicos y biológicos del agua residual, para determinar las condiciones de funcionamiento del sistema.
- Seleccionar un método apto de oxidación del efluente del Humedal Artificial, para mejorar su tratabilidad y calidad, de acuerdo con la teoría y los resultados de calidad del agua obtenidos.
- Aplicar el método oxidativo seleccionado, para comprobar o su eficiencia o sus dificultades respecto a la calidad del agua a tratar, mediante ensayos en laboratorio.
- Analizar según los resultados obtenidos de calidad del agua del efluente, si es posible reusar el agua en agricultura bajo estándares de calidad nacionales e internacionales.

1.5. ALCANCE

El proyecto se realizará en las instalaciones de la Universidad Militar Nueva Granada en el Edificio C, donde se encuentra ubicado el Humedal Artificial, en el Laboratorio de Calidad de Aguas, Biblioteca, Hemeroteca y Sala de Internet de la Universidad.

El proyecto se realizará en un periodo de 26 semanas, con intensidad horaria de 60 horas mensuales para un total de **360 horas**.

1.6. HIPÓTESIS

Uno de los objetivos principales del tratamiento de aguas residuales corresponde a la disminución de la concentración de compuestos orgánicos biodegradables, además de la remoción de nutrientes y metales pesados entre otros, por medio de diferentes técnicas, unas mas avanzadas que otras pero encaminadas todas a la obtención de un agua de mejor calidad. Para lograr la destrucción de los organismos presentes que causan algunas enfermedades, se ha estudiado la utilización de técnicas oxidativas que permiten la desinfección del agua y mejoramiento de la biodegradabilidad.

Existen métodos químicos, físicos, mecánicos y de radiación para lograr la oxidación del agua residual, cada uno con un grado de efectividad específico y unos menos costosos que otros, dependiendo de la calidad del agua a tratar.

Para su utilización se requiere de un tratamiento preliminar logrado por medio de un Humedal Artificial de flujo vertical que permite obtener un efluente del sistema menos contaminado, dado que éstos cumplen el papel de depuradores. Por lo tanto, al tratar aguas residuales se mejoran las condiciones de los cuerpos de agua receptores de las descargas, se incrementa el saneamiento

ambiental en las comunidades, es posible mejorar los problemas de salud pública ahorrando recursos. Adicionalmente, la posibilidad de reutilizar el agua tratada en otra actividad, evita que continúen agotándose las fuentes de agua existentes debido al aumento de la demanda de dicho recurso.

1.7. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

DESINFECCIÓN: es la inactivación selectiva de especies de organismos presentes en un efluente sanitario, en especial aquellas que amenazan la salud humana.

EFLUENTE: es la salida o la descarga de un tratamiento con unas características tales, que permitan evaluar el sistema.

REACTOR: es un recipiente cualquiera en el que ocurren reacciones de consumo o decaimiento de reactivos y formación de productos. Existen reactores a pistón, en el que cada partícula del líquido permanece en el reactor el mismo tiempo, y reactores de mezcla completa, en el que se mezcla toda la masa completa con homogeneidad.

PATÓGENO: es aquel elemento o medio que produce una enfermedad. En general, son aquellos microorganismos presentes en el agua.

SANEAMIENTO BÁSICO: es el manejo adecuado y tratamiento de aguas residuales, manejo adecuado y tratamiento de residuos sólidos, y el fortalecimiento de la higiene personal y del sitio de trabajo.

1.8. EVALUACIÓN DEL PROBLEMA

Nº	PREGUNTA	RESPUESTA	
		SI	NO
Consideraciones Personales			
1	Se relaciona el problema planteado con mis propósitos y los de mi grupo de trabajo?	X	
2	Existe un interés real y positivo en el desarrollo de esta investigación en el área sanitaria?	X	
3	Resulta posible hallar la información técnica necesaria acerca de los tratamientos avanzados de desinfección?	X	
4	Cuento con los equipos, materiales y reactivos necesarios del Laboratorio de Calidad de Aguas para el desarrollo de las actividades experimentales planteadas?	X	
5	Son suficientes los fondos económicos requeridos para la adquisición de materiales y trabajos de campo que permitan culminar satisfactoriamente esta investigación?	X	
6	Existe un grado de confiabilidad tal que me permita tener certeza de los valores obtenidos en las prácticas de Laboratorio, por medio de las recomendaciones ya existentes?	X	
7	Acepto a satisfacción los requerimientos necesarios por parte de la Facultad de Ingeniería acerca del alcance y procedimientos a los que se somete la opción de grado de Auxiliar de Investigación?	X	
8	Cuento con el soporte administrativo, y la orientación técnica y metodológica para la ejecución y cumplimiento satisfactorio de este trabajo de investigación?	X	
Consideraciones Sociales			
9	La solución del problema planteado permitirá realizar un aporte importante a la comunidad científica en el área sanitaria y ambiental?	X	
10	Aportan los resultados de esta investigación algún conocimiento práctico para la comunidad en general?	X	
11	Cuales son los requerimientos necesarios para la aplicación de los resultados de esta investigación a una comunidad dada, y que tiempo exige?	X	
12	La aplicación de técnicas oxidativas avanzadas para el tratamiento de aguas residuales incluyendo un tratamiento biológico por medio de un Humedal Artificial como campo de investigación ha sido tratado por otro grupo o persona dentro del ámbito académico conocido?		X

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. HUMEDALES ARTIFICIALES

En general, se definen los Humedales Artificiales como zonas húmedas o zonas pantanosas, pantanos, marismas, charcas, turberas, aguas rasas, riveras, areneros o canales abandonados, naturales o artificiales, temporales o permanentes con aguas fijas o corrientes, de carácter dulce, salino o salobre. (Seoáenz, 1999, p. 52).

IWA, 2000, define un humedal como una zona inundada o saturada, bien sea por aguas superficiales o por aguas subterráneas y con una frecuencia, duración y profundidad suficientes para mantener especies de plantas predominantemente adaptadas a crecer en suelos saturados. En estos sistemas, los contaminantes presentes en las aguas residuales son removidos por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que se efectúan en el ambiente natural, entre estos procesos se encuentran la sedimentación, la adsorción a las partículas del suelo, la asimilación por la plantas y la transformación microbiana.

Además de la depuración de aguas residuales, los humedales ofrecen beneficios ambientales agregados como son: mejorar la calidad ambiental, crear y restaurar nichos ecológicos, generar mejoramientos paisajísticos, contribuir en la generación de zonas de amortiguamiento de crecidas de ríos y avenidas, además, son fuente de agua en procesos de reutilización de aguas residuales para riego y aportan ventajas en otras actividades de carácter lúdico y económico.

Durante las últimas dos décadas, las múltiples funciones de los humedales han sido reconocidas no solo por científicos y expertos en el área, sino por el público en general, dado que éstos tienen la capacidad de transformar y almacenar la materia orgánica. (BRIX, 1995, p.209). La investigación científica y sistemática amplió el horizonte de aplicaciones de los humedales como sistemas de control de contaminación

Las ventajas que presentan estos sistemas son principalmente:

- Construcción económica.
- Consumo de energía para operación y mantenimiento casi despreciable.
- Toleran altas fluctuaciones de caudal y carga orgánica.
- Tratan aguas residuales con características físico-químicas variables en composición y concentración.
- El agua efluente de estos sistemas se puede reciclar o reutilizar, según necesidades particulares y restricciones regulatorias.
- Aprovechan los recursos naturales.

Las aguas servidas son dirigidas hacia la superficie del humedal por tubería de repartición uniforme, allí se filtran de manera vertical hacia el fondo, donde una serie de ductos recogen las aguas tratadas. La alimentación se realiza de manera intermitente, lo que hace que el flujo normalmente no sea en medio saturado.

2.1.1. Vegetación

La vegetación necesaria para implantar en los humedales artificiales es un factor significativo para obtener rendimientos óptimos en la depuración de aguas residuales. Para ello, se deben tener en cuenta algunos factores tales como:

- Tipo de humedal.
- Temperatura ambiente.
- Superficie del humedal.
- Profundidad de la instalación.
- Composición de los vertidos al humedal.
- Evolución de los rizomas.
- Necesidad o no de recolección periódica de la vegetación.
- Tipo de sustrato.

De tal manera es posible determinar las principales funciones de la vegetación en estos sistemas, entre ellas:

- Mantener la capacidad hidráulica del suelo.
- Suministrar oxígeno al suelo.
- Retener y procesar los nutrientes existentes.
- Mantener bacterias.
- Desarrollar el depósito de sedimentos.
- Retener y procesar numerosos productos que se pueden incorporar a sus ciclos metabólicos.
- Constituir una biocenosis biológicamente muy activa en todos sus componentes.

2.1.2. Tipos De Humedales

Estos principalmente pueden ser clasificados de acuerdo con el material vegetal utilizado en los lechos, luego pueden ser:

- Humedales contruidos, basados en macrófitas flotantes.
- Humedales contruidos, basados en macrófitas de hojas flotantes.
- Humedales contruidos, con macrófitas sumergidas.
- Humedales contruidos, con macrófitas emergentes.

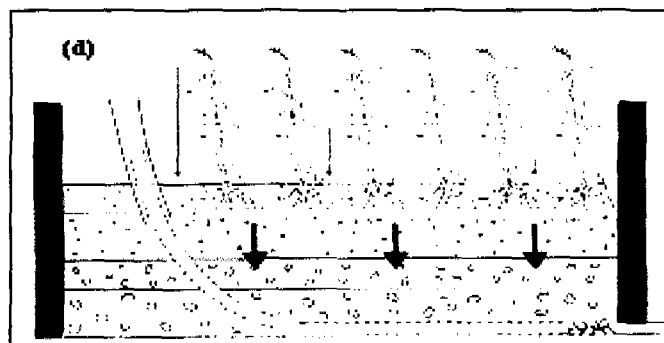
De acuerdo con las condiciones de adaptabilidad de las plantas, se utilizará un tipo de humedal específico que sea apto para mantenerse bajo unas condiciones del ambiente. Sin embargo, las macrófitas emergentes han presentado buena capacidad de adaptación por lo que pueden clasificarse los humedales que utilizan este tipo de vegetación, de acuerdo al tipo de flujo a través del lecho. Estos son:

- *Humedales de Flujo Superficial*: Sistemas de flujo libre
- *Humedales de Flujo Sub-Superficial*: Sistemas con flujo horizontal sub-superficial.
- *Humedales de Flujo Vertical*: Sistemas con flujo vertical.
- *Sistemas Híbridos*.

2.1.3. Humedales Artificiales De Flujo Vertical

En este tipo de humedales, el agua fluye de manera descendente y percola en el humedal. El agua se vierte y se distribuye en la superficie del lecho y percola en el mismo, entre las diferentes capas de material filtrante de relleno. (Ver Figura 1). Evita la emisión de olores, no presentan problemas con la fauna, y el lecho de grava presenta mayores tasas de reacción, por lo tanto puede tener un área menor.

Figura 1. Humedal de Flujo Vertical.



Fuente: COOPER, 1998. A review of the design and performance of vertical flow and hybrid reed bed treatment systems.

Los mecanismos más importantes que intervienen en los procesos de depuración en un Humedal Artificial de Flujo Vertical (HAFV) se pueden observar en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales.

CONTAMINANTE	PROCESOS DE DEPURACION
Materia Orgánica	Reducción por conversión biológica por medio de bacterias facultativas y anaerobias adheridas a las superficies de las plantas y detritos.
Materia en suspensión	Filtración
Nitrógeno	Nitrificación/Desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.
Fósforo	Filtración, sedimentación, absorción, y asimilación por las plantas.
Metales Pesados	Absorción a las raíces de las plantas, sedimentación y filtración.
Patógenos.	Muerte natural, depredación, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.

Fuente: CRITES & TCHOBANOGLOUS, 1998. Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización

El uso de Humedales artificiales se ha aplicado en investigaciones en el área del tratamiento de aguas residuales, como es el caso del uso de un Humedal Artificial de Flujo Vertical para mejorar la calidad del agua del Río Bogotá⁴ en el que los resultados obtenidos permitieron determinar reducciones de $DBO^{20}_5 = 37\%$, $DQO = 10\%$, Coliformes Totales = 49%, Sólidos Totales = 16%, Sólidos

⁴ RODRIGUEZ, Tatiana. OSPINA; Ivonne. HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO VERTICAL PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO BOGOTÁ. Revista Ciencia e Ingeniería N° 15. Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada. 2005

Suspendidos Totales = 27%, Nitritos = 83%, Nitratos = 30%, mejorando la calidad del agua del Río Bogotá a escala laboratorio.

Por otro lado, respecto al potencial de remoción de fósforo en los humedales construidos, se ha sido estudiado en varios experimentos teniendo en cuenta parámetros como la tasa y frecuencia de la carga y la temperatura del tratamiento, en los que se ha encontrado que los pulsos de carga frecuentes incrementan la tasa de nitrificación (BRIX, ARIAS & JOHANSEN, 2003). Con relación a la remoción de organismos indicadores, expertos sugieren que la filtración es el mejor mecanismo en humedales artificiales de flujo vertical. (ARIAS, CABELLO, BRIX & JOHANSEN, 2003).

De igual manera, se han construido humedales artificiales para verificar las ventajas del sistema en condiciones climáticas propias el trópico, como son los casos de la Base Naval en la Isla de San Andrés, que utiliza un Humedal de flujo vertical para el tratamiento del agua utilizada dentro de la misma, y otro es el del Centro de Tecnologías Ambientales CITA del programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Corporación Universitaria de la Costa CUC, que proponen ésta opción como tratamiento de aguas residuales municipales en poblaciones pequeñas de la región Caribe. Para éste último proyecto, en la fase de arranque y estabilización, las eficiencias de remoción obtenidas fueron 97% para SST y 66% para DBO₅ a 20°C, en un humedal artificial de flujo sub-superficial, es decir, se cumple el proceso de remoción de grandes cantidades de sólidos suspendidos. De allí se concluyó que:

El diseño de humedales artificiales se constituyen en una alternativa sostenible de fácil implementación, que no requiere mano de obra especializada y que puede ser aplicada en municipios con escasos recursos, tomando como principal factor los componentes de su propio entorno, dándole así utilidad económica a las grandes extensiones de tierras con que cuentan. (HIGUITA, ARDILA, MOSQUERA, 2004).

2.2. OXIDANTES QUÍMICOS

2.2.1. Desarrollo de las Técnicas Oxidativas

Dos reglas básicas se pueden ya encontrar en el año 2000 A.C que decía que las aguas debían ser expuestas a la luz del sol y filtrada con carbón. El agua impura se debía hervir e introducir un trozo de cobre siete veces, antes de filtrar el agua. Existen descripciones de civilizaciones antiguas en referencia al agua hervida y el almacenamiento del agua en recipientes de plata. Para llevar a cabo la purificación del agua se utilizaban el cobre y técnicas de electrólisis. La desinfección se ha utilizado durante muchos siglos, sin embargo los mecanismos de desinfección no son conocidos hasta hace unos pocos cientos de años (TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, producido por LENNTECH, disponible en: <<http://www.lennotech.com>>, acceso en: 25-Jul-2007)

En el año 1680 Anthony van Leeuwenhoek desarrollo el microscopio. El descubrimiento de los microorganismos se considero una curiosidad. Pasarían otros doscientos años hasta que los científicos utilizaran este invento, el microscopio, para la identificación y comparación de microorganismos y otros patógenos.

En el siglo XIX se descubrieron los efectos de los desinfectantes en el agua para el tratamiento y desinfección de la misma. Desde 1900 los desinfectantes se utilizan extensamente por las compañías del agua para evitar la expansión de enfermedades y mejor la calidad del agua. Sin embargo, respecto al uso de sustancias químicas para el tratamiento de aguas residuales, existen unas sustancias que oxidan, es decir, reducen compuestos orgánicos o inorgánicos* y hay otras que desinfectan, es decir inactivan microorganismos.

* Compuestos Orgánicos se refiere a las sustancias químicas basadas en cadenas de Carbono e Hidrógeno. En muchos casos contienen Oxígeno, y también Nitrógeno, Azufre, Fósforo, Boro y Halógenos. Y los inorgánicos con excepción de algunos silicatos no forman cadenas.

Para garantizar la seguridad del agua potable los sistemas de oxidación se aplican generalmente en una etapa final del tratamiento. Existen diferentes agentes, que pueden desactivar los microorganismos patógenos. Por ejemplo la aplicación de cloro o sustancias que contienen cloro, peróxido, bromo, plata, cobre, ozono y rayos UV. Todos estos sistemas de tratamiento tienen ventajas y desventajas y se aplican para el tratamiento del agua dependiendo de las circunstancias particulares.

2.2.2. Métodos de Oxidación

La desinfección de aguas es un proceso que se incluye dentro de las técnicas de oxidación, por lo que se puede definir su utilización en el tratamiento de aguas residuales. De tal manera, la desinfección de aguas significa la extracción, desactivación o eliminación de los microorganismos patógenos que existen. La destrucción y/o desactivación de los microorganismos supone el final de la reproducción y crecimiento de estos microorganismos. Si estos microorganismos no son eliminados el agua no es potable y por lo tanto es susceptible de causar enfermedades, por lo que el agua potable no puede contenerlos. (BUSCADOR, producido por: WIKIPEDIA, disponible en: <www.wikibooks.org>, acceso en: Mar-18-2006). Por lo tanto, la desinfección busca inactivar selectivamente especies de organismos presentes en un efluente sanitario, en especial aquellas que amenazan la salud humana. (PROSAB⁶, 2003, p.2)

Los mecanismos envueltos en la desinfección de organismos patógenos se pueden dividir en tres:

- ✓ Destrucción de la pared celular o núcleo del organismo, impidiendo que se desenvuelvan sus funciones elementales adecuadamente

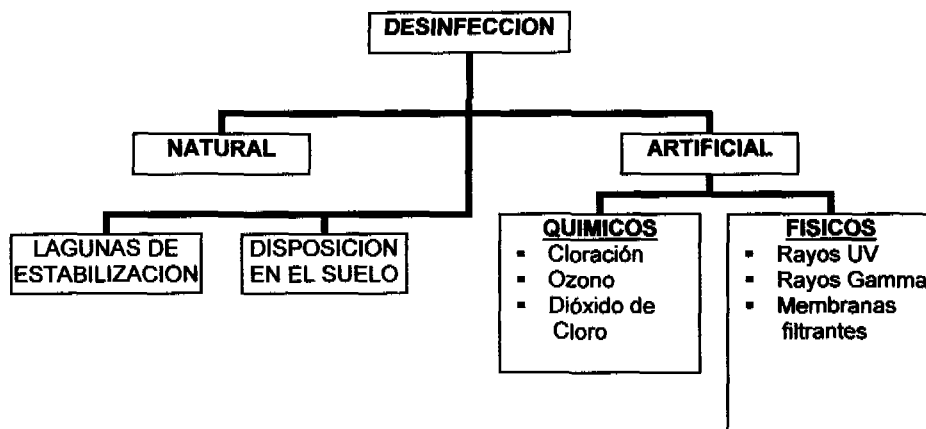
⁶ PROSAB (Red Cooperativa de Investigaciones en Saneamiento Básico, Brasil-2003)

- ✓ Alteración de compuestos envueltos en el catabolismo, alterando el balance de energía de la célula.
- ✓ Alteración de los procesos de síntesis y crecimiento celular por alteración de funciones como síntesis de proteínas, ácidos nucleicos y coenzimas.

La oxidación se logra mediante agentes químicos y/o físicos, que son capaces de extraer contaminantes orgánicos del agua, es decir, aquellos nutrientes que mantienen a los microorganismos. Estos agentes no solo deben matar a los microorganismos sino que deben además tener un efecto residual, que significa que se mantienen como agentes activos en el agua después de la desinfección para prevenir el crecimiento de los microorganismos en las tuberías provocando la recontaminación del agua.

Los procesos de desinfección se pueden clasificar de procesos naturales o artificiales como lo muestra la figura 2.

FIGURA 2. Procesos de desinfección



Fuente: PROSAB. Procesos de desinfección de efluentes sanitarios.

Los factores a evaluar durante el proceso de desinfección son: *La Cinética de Decaimiento*, referente a la resistencia del organismo patógeno a un agente desinfectante, y el *Comportamiento Hidrodinámico*, que es el paso del líquido en su interior. Pero principalmente el estudio del tratamiento debe centrarse en lo referente a la Cinética de la Desinfección

2.2.3. Cinética de la Desinfección

Según la Wastewater Disinfection Federation *WEF*, 1996, la destrucción de bacterias y virus resulta de las acciones físicas, químicas y bioquímicas que pueden ser previstas por medio de expresiones cinéticas simples. Pero su aplicabilidad no es de carácter universal, por lo que, están sujetas a las condiciones locales específicas que pueden exigir alteraciones sustanciales en los modelos experimentales. El proceso de la desinfección depende entonces de la intensidad de los agentes físicos o químicos utilizados.

El efecto de la concentración o la intensidad del agente desinfectante sobre la velocidad de destrucción son imprescindibles para la asociación con el tiempo de contacto y la definición de las dosis a ser utilizadas.

Esta relación fue planteada por CHICK en 1908, reconociendo que la inactivación de microorganismos en función del tiempo obedece al modelo de una reacción de primer orden, por lo que deduce que la velocidad de decaimiento de los microorganismos se representa en la ecuación 1:

$$-\frac{\partial N}{\partial t} = k * N \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

k = coeficiente de reacción, T^{-1}

N = Número de microorganismos sobrevivientes en un instante dado.

t = Tiempo T

Para lo que se plantea la Ley de Chick con la ecuación 2:

$$N = N_0 * e^{-k*t} \quad (\text{Ecuación 2})$$

En la misma época, WATSON plantea una relación similar de acuerdo al análisis de diferentes sistemas con varias concentraciones de desinfectantes, demostrando que la relación logarítmica definida entre la concentración del desinfectante y la velocidad media de reacción. La expresión derivada es la descrita en la Ecuación 3:

$$k = k' * C^n \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

C = Concentración del desinfectante. $M * L^{-3}$

N = coeficiente.

k' = Coeficiente de reacción de inactivación independiente de C y N , T^{-1}

Finalmente, lo que se propuso fue la relación de ambos estudios, planteando la que se conoce como *Ley Chick-Watson*, por medio de la Ecuación 4:

$$-\frac{\partial N}{\partial t} = k * N * C^n \quad (\text{Ecuación 4})$$

De acuerdo con los procesos de desinfección mencionados en la Figura 2, existen procesos artificiales de tipo químico para el tratamiento de aguas, entre los que se encuentra la desinfección por medio del cloro.

De acuerdo con los procesos de desinfección mencionados en la Figura 2, existen procesos artificiales de tipo químico para el tratamiento de aguas, entre los que se encuentra la desinfección por medio del cloro.

Según PROSAB 2003, ésta sustancia química es una de las más utilizadas en todo el mundo para la desinfección de aguas y efluentes.

De tal manera es necesario describir el efecto del cloro en la eliminación o inactivación de los organismos presentes, para el mejoramiento de la calidad del agua a tratar.

Para el estudio de la Cinética de la desinfección, se pueden estudiar tres modelos de tipo lineal que pueden ajustarse a los datos obtenidos, estos son, Modelos de Chick, Watson y Hom.

2.2.4. Desinfección por Cloro

El Cloro Cl_2 es, en condiciones normales de presión (1033 kg/cm^2) y temperatura (0°C), un gas verde, 2.5 veces más pesado que el aire. Se obtiene en forma gaseosa desintegrando por electrólisis (descomposición de una sustancia en disolución mediante corriente eléctrica), el cloruro de sodio NaCl en sodio y cloro, el cual se comprime a 1.74 atmósferas y se enfría a -4 ó 18°C hasta licuarlo, después se envasa en cilindros metálicos de 100, 150 y 2.000 libras que lo mantienen a alta presión.

Es un poderoso oxidante y potente germicida, además de que es económico y fácil de aplicar (CIENCIA Y BIOLOGIA, Producida por: SOLOCIENCIA, disponible en :<www.solociencia.com>, acceso en: Jun-30-2006). Fue descubierto por Scheele en 1.774 y empleado por primera vez en América como desinfectante del agua en 1.908 por Jonson y Leal en Nueva Jersey. (ARBOLEDA, 2000, p.645).

El cloro elimina las bacterias, hongos, virus, esporas y algas presentes en el agua, reduce malos olores y sabores al oxidar sustancia como el Hierro y el

desinfección. Adicionalmente, los compuestos basados en cloro son los únicos con las propiedades residuales duraderas que previenen el crecimiento microbiano y proporcionan protección continua.

El cloro puede aplicarse también utilizando algunas de sus sales. Las más conocidas de éstas son el *hipoclorito de sodio* y el *hipoclorito de calcio* que se expanden en polvo o en solución con concentraciones entre 12 y 70%. El Cloro y los hipocloritos producen reacciones similares en el agua y su eficiencia bactericida es idéntica. La única diferencia es que el cloro baja el pH y el hipoclorito lo sube ligeramente. El costo de la hipocloración, sin embargo, es más alto que el de la cloración con cloro gaseoso. (ARBOLEDA, 2000, p.645)

2.2.5. Características que influyen en el Proceso de Desinfección.

Existen varios parámetros que deben tenerse en cuenta al momento de utilizar un método de desinfección por cloración, entre ellos se encuentran:

Temperatura: Las bacterias viven entre 5°C y 80°C, a mayor temperatura, las reacciones ocurren mas rápido, la densidad, viscosidad y solubilidad del cloro líquido disminuyen a medida que aumenta la temperatura.

Potencial de Hidrógeno: Las bacterias son muy susceptibles al pH, dado que no sobreviven a potenciales muy altos o muy bajos, además, la eficiencia del cloro libre disminuye al aumentar el pH.

Turbiedad: Hace mas lenta la acción del cloro, lo que se refleja en el aumento del tiempo de contacto.

Fenoles: Pueden reaccionar con el cloro formando compuestos que producen un sabor a yodoformo que se puede detectar en concentraciones pequeñas.

Fenoles: Pueden reaccionar con el cloro formando compuestos que producen un sabor a yodoformo que se puede detectar en concentraciones pequeñas.

La eficiencia de la desinfección con cloro puede analizarse desde tres puntos de vista:

- a) Tipo de microorganismo a destruir, debido a la distinta sensibilidad a los desinfectantes.
- b) Compuesto de cloro formado en el agua; que pueden ser: el ácido hipocloroso (HOCl), ion hipoclorito (OCl^-), monoclорamina (NH_2Cl) y dicloramina (NHCl_2), cada uno con un poder desinfectante en el agua.
- c) Tiempo de contacto del cloro con el agua, relacionado con el porcentaje de organismos destruidos.

2.3. REUSO DE AGUAS

2.3.1. Desarrollo del reuso de aguas

La reutilización del agua es un tema importante debido al ahorro que se produce, evitando vertidos incontrolados y las consiguientes contaminaciones. Esta actividad se viene realizando desde la antigüedad a pequeña escala, sin embargo, en la actualidad, debido al aumento drástico de las aguas residuales, se hace necesaria la reutilización a gran escala.

El reciclado para el riego sólo necesita tratamiento secundario, pues no requiere tanta calidad como un agua para consumo humano. Por lo tanto se pueden permitir la presencia de algunas sustancias en cantidades específicas, o controladas, que podrían ser benéficas como fertilizantes y oligoelementos*.

* Son sustancias que intervienen en las funciones respiratoria, digestiva, neurovegetativa y muscular, como reguladores y equilibrantes. Hierro, cobre, yodo, manganeso, selenio, zinc, cromo, cobalto, fluor, litio, níquel y silicio son los oligoelementos más importantes.

(CASTAÑON, 2000). El riego con aguas residuales está aumentando regularmente por las siguientes razones:

- Necesidad de evacuar de forma económica volúmenes crecientes de aguas residuales, principalmente en las zonas urbanas.
- El riego es una fuente de agua y nutrientes para las plantas y su uso sobre suelo agrícola aporta una fácil y cómoda solución al problema medioambiental de la contaminación por aguas residuales.
- Necesidad de aumentar el abastecimiento de agua, debido a la elevación del nivel de vida, para consumos domésticos, industriales y agrícolas en zonas de continuo desarrollo.

Sin embargo, el uso de aguas residuales en el riego, genera una desconfianza de los agricultores a utilizar este producto debido a su origen y a la posibilidad de contaminación. Pero finalmente, se debe tener en cuenta que el agricultor sólo lo utilizará si obtiene algún beneficio, por lo que su precio debe ser menor al del agua utilizada tradicionalmente.

De acuerdo con el Ingeniero sanitario Miguel Peña Varón, del Instituto de Investigación y Desarrollo en Agua Potable, Saneamiento Básico y Conservación del Recurso Hídrico, *CINARA*, de la Universidad del Valle, cuando se habla de reuso la gente piensa en un tratamiento que le remueva el 100% de la contaminación al agua.

Sin embargo, de acuerdo con el uso que se haga del efluente no siempre es necesario alcanzar estos niveles de tratamiento para controlar los riesgos. Por ejemplo en el reuso de agua para fines agrícolas, existen otras medidas de control de riesgo dependiendo de si el riego es restringido o no restringido.

Esta forma de utilizar el agua residual favorece la preservación de fuentes naturales, y en cuanto a nutrientes se obtiene una ventaja máxima de la materia orgánica presente en el agua. Tener más líquido para regar los cultivos, favorece la producción de alimentos que van a mejorar la nutrición de la población especialmente en los países áridos. Según el Doctor David Duncan Mara, profesor de Ingeniería Civil y Salud Pública de la Universidad de Leeds, en Inglaterra, al utilizar agua residual aumentan los beneficios ambientales y económicos, debido a que los efluentes ocasionan un incremento en el rendimiento de los cultivos entre el 30 y el 50% comparado con agua comúnmente utilizada para riego (ARTICULOS DE INVESTIGACIÓN, producido por: UNIVERSIDAD DEL VALLE, disponible en: <www.univalle.edu.co>, acceso en: Ago-24-2006).

2.3.3. Calidad del agua para reuso

La Calidad del agua para riego es uno de los principales factores que determinan las condiciones del mismo, respecto a su economía en las instalaciones, de tal manera se analizan principalmente las sustancias disueltas o en suspensión, ya que nunca se dispone de agua completamente pura. Las principales características para determinar la calidad del agua de riego son:

- Cantidad o concentración total de sales solubles existentes.
- Cantidad o concentración de sodio.
- Concentración de boro y otras sustancias tóxicas.

La salinidad es el factor más importante ya que puede producir graves problemas de difícil solución, luego, dado que una misma cantidad de sales estará más o menos concentrada según el contenido hídrico del suelo, la concentración de sales no se puede considerar como un indicador adecuado de

salinidad por lo que estudia la conductividad eléctrica como parámetro de medida.

Se debe tener en cuenta que los cultivos no se desarrollan en el agua aplicada con el riego, sino en soluciones de ella en el suelo, siendo las características de estas soluciones las que también se deben tener en cuenta para determinar producciones.

Para determinar la calidad del agua de riego es necesario conocer las características de la misma, lo que se obtiene mediante el análisis y determinación de:

- Contenido total de sales (expresado por la conductividad eléctrica).
- Análisis químico de los principales iones: calcio, sodio, magnesio, carbonatos, cloruros y sulfatos.
- pH
- Contenido de sustancias tóxicas, principalmente boro.

Respecto al reuso de aguas residuales se han hecho afirmaciones tales como:

“La presión que ejerce la demanda de agua para consumo humano, sobre las fuentes de agua superficiales y subterráneas que tradicionalmente han sido utilizadas para riego de cultivos y los requerimientos de calidad no potable para la agricultura, han hecho que las aguas residuales domésticas se conviertan de un desecho a un recurso valioso para su uso en agricultura...El uso de las aguas residuales para riego de plantas debe permitir el aprovechamiento de los nutrientes contenidos en las mismas para disminuir los gastos en el consumo de fertilizantes químicos” (INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA IMTA, 2003).

2.3.4. Estándares de la Calidad del Agua.

El Marco Legal Nacional Colombiano está compuesto por diferentes leyes, acuerdos, decretos, resoluciones, normas y reglamentos en materia del agua,

todos relacionados con el cuidado del medio ambiente y con el ambiente sano necesario para todas las personas. Algunos de ellos son:

- Ley 9 de 1979 CODIGO SANITARIO NACIONAL: Fija los procedimientos para la regulación, la legalización, y el control de las descargas de residuos, las condiciones sanitarias del medio ambiente.
- Decreto 1594 de 1984: Criterios de calidad del agua según los usos y normas sobre vertimientos líquidos.
- Ley 373 de 1997: Uso eficiente y ahorro del agua.
- Guías de la Organización Mundial de la Salud OMS
- Guías de la Environmental Protection Agency EPA
- Resolución 1074 del 28 de Octubre de 1997 Estándares Ambientales en Materia De Vertimientos

De acuerdo con las normas de calidad del agua, se debe tener en cuenta la lista de parámetros y concentraciones admisibles para que el agua no constituya un riesgo para la salud, para un proceso, un uso o actividad. Para el caso de ésta investigación se deben tener en cuenta aquellos valores guía relacionadas con el uso del agua en actividades de tipo agrícola, que principalmente son las mencionadas con anterioridad, y son las de objeto de análisis.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ACTUAL

Para la realización de éste trabajo se eligió como tratamiento del agua la utilización de un Humedal Artificial de Flujo vertical ya construido, que permitiera la reducción de la carga contaminante de la misma. Este Humedal Artificial fué diseñado y construido por el grupo de investigación de Ingeniería Sanitaria (GIS) de la Universidad Militar Nueva Granada, con las características consignadas en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Características Humedal Artificial construido.

TIPO DE CONTENEDOR	Plástico
CAPACIDAD CONTENEDOR	1000 lts
DIMENSIONES CONTENEDOR	0.9m ancho, 1.1m largo, 1.0m alto
SISTEMA DE AIREACION	Toberas en PVC de 2'' perforadas
CAPA INFERIOR	Grava de ¾''-1 1/2''
CAPA SUPERIOR	Arena con Cu=3.2
TIPO DE VEGETACION	Emergente (Typha extraída del Humedal de Capellanía)
SISTEMA DE DISTRIBUCION	Tubería en PVC alta presión de 1''
SISTEMA DE BOMBEO	Electrobomba 0.5 HP
MANDO ELECTRONICO DE OPERACION	Temporizador multirango de 0-60 seg. Temporizador multirango de 0-60 min Contactor de 32 AP

Fuente: Reducción de Nutrientes e Indicadores de contaminación fecal en un humedal artificial de flujo vertical experimental.

Algunas recomendaciones que arrojó el trabajo mencionado, se refiere entre otras a:

- Operar el sistema con rengos de carga orgánica entre 54.9 y 137.4 Kg DBO₅/Ha-día, para mejor eficiencia en su operación.
- Manejo de especímenes adultos y mayor cubrimiento sobre el área superficial.
- Ubicación del sistema en un lugar donde no se presenten grandes corrientes de aire para permitir la integración con el medio ambiente.

Para esta investigación, se utilizó el Humedal ubicado junto al Edificio C de la Universidad Militar (Ver Figura 3), operando de manera normal, y realizando el mantenimiento respectivo de la vegetación, es decir, haciendo replanteos periódicos que permitieran que todo el sistema trabajara de manera eficiente. Se realizaron igualmente revisiones periódicas de la bomba y de los temporizadores, ajustándolos a las condiciones requeridas.

Figura 3. Estado inicial del Humedal Artificial construido.



De acuerdo con lo anterior, el sistema desarrollado para este proyecto consistió en el esquema conformado por las siguientes etapas:

1. Tratamiento físico del agua residual doméstica del pozo séptico del edificio C de la Facultad de Economía de la Universidad Militar.,
2. Tratamiento biológico realizado en el Humedal Artificial construido.
3. Tratamiento químico por medio de la aplicación de un método oxidativo.

La realización de las prácticas de laboratorio se dividió en dos fases, la primera denominada FASE I: Caracterización afluente-efluente del Humedal Artificial de Flujo Vertical, y la segunda fase, denominada FASE II: Aplicación de un oxidante químico al efluente del Humedal Artificial. Para cada fase se realizaron los parámetros contenidos en los Cuadros 4 y 5:

Cuadro 4. Ensayos FASE I.

NOMBRE	NORMA
pH	AWWA 4000H
Temperatura	AWWA 2550
Turbiedad	AWWA 2130
Sólidos	AWWA 2540B
Nitritos	Kit de Merck
Nitratos	Kit de Merck
Dureza Total	AWWA 2340C
Dureza por Calcio	AWWA 2340C
Alcalinidad	AWWA 2310B
Acidez	AWWA 2320B
Fósforo	Método del Persulfato
Cloruros	AWWA 4500 Cl ⁻
Oxígeno disuelto	AWWA 5210B
DBO ₅	AWWA 5210B
DQO	AWWA 4500 O ₂
Coliformes Fecales	Método Filtro-Membrana

Teniendo en cuenta que el objetivo principal de los procesos oxidativos cuando se emplea cloro, es la inactivación de microorganismos presentes en el agua, se realizaron únicamente los siguientes parámetros para analizar la eficiencia de la aplicación, los coliformes como mecanismo indicador, determinación de fósforo para observar el contenido de nutrientes y el cloro libre para determinar posibles sub-productos.

Cuadro 5. Ensayos FASE II

NOMBRE	NORMA
pH	AWWA 4000H
Temperatura	AWWA 2550
Turbiedad	AWWA 2130
Fósforo	Método del Persulfato
Coliformes Fecales	Método Filtro-Membrana
Cloro Libre	AWWA 4500 Cl ⁻

Cuadro 6. Descripción oxidantes físicos y químicos.

AGENTE	OBSERVACIONES
Luz Solar	Es eficaz por la penetración de los rayos en el agua, pero resulta difícil por la presencia de material particulado. Se realiza por medio de lámparas especiales de un alto costo.
Ozono	Es muy eficaz, pero no deja una concentración residual que permita medir su presencia. El equipo necesario es bastante costoso y difícil de conseguir.
Dióxido de Cloro	Puede producir algunos subproductos finales potencialmente tóxicos como el clorito y el clorato. Su generación se debe hacer in situ dado que es un gas inestable y explosivo.
Bromo	Alto costo
Yodo	Es eficiente para destruir coliformes y matar amibas, produce un sabor medicinal en el agua.
Rayos UV	Montaje muy costoso.
Hipoclorito de Sodio	Facilidad de manejo, a bajo costo. Puede generar diferentes tipos de subproductos.

De allí se determinó, que el **Hipoclorito de Sodio NaOCl** era el mejor agente a utilizar por las siguientes razones: hay confiabilidad en que permite la reducción de microorganismos por ser comúnmente utilizado, es un producto asequible, es de fácil aplicación por ser líquido, las dosis se pueden medir con exactitud.

3.2.3. Aplicación de NaOCl Hipoclorito de Sodio

Teniendo en cuenta los requerimientos específicos para la aplicación de una técnica oxidativa, se realizó en primera medida el planteamiento de la forma de aplicación del oxidante, realizando variaciones respecto a las dosis y a los tiempos de retención, según se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Aplicación Hipoclorito de Sodio.

DOSIS (mg/ l)	TIEMPOS (min.)			
	5	15	30	45
1	X	X	X	X
2	X	X	X	X
4	X	X	X	X
6	X	X	X	X
8	X	X	X	X
10	X	X	X	X

Adicionalmente se tuvieron en cuenta algunas condiciones al momento de realizar el método de oxidación:

- a) **Temperatura:** Se realizaron los ensayos respectivos en las horas de la mañana de cada día con un valor promedio de 17°C, evitando variar dicho valor, con lo que se afectarían las reacciones ocurridas.
- b) **Aplicación NaOCl:** Las dosis elegidas fueron medidas de manera exacta por medio de una micropipeta, garantizando una medición correcta. Luego, se realizaron las adiciones de Hipoclorito de sodio de manera uniforme sobre la superficie del agua contenida en bikers, para que se realizara una mezcla completa.
- c) **Mezcla Completa:** Se utilizó un montaje compuesto por varias paletas que agitan el agua para mezclar y que se ajustan a una misma velocidad, las cuales se ubican justo en el centro del biker garantizando la mezcla del total del agua de análisis,
- d) **Tiempos de Retención:** Se midieron los diferentes tiempos de retención por medio de un cronómetro, permitiendo lograr exactitud en el proceso de mezcla.

La mezcla del agua residual con el oxidante químico se realizó en el montaje presentado en la Figura 4, en la que se observan bikers de 1 litro cada uno, los cuales son ubicados debajo de una paleta metálica que realiza la mezcla del agua de manera regulada a una velocidad de 41 RPM (revoluciones por minuto) por medio del controlador de mezcla mostrado en la Figura 5.

Figura 4. Bikers para realización de mezcla

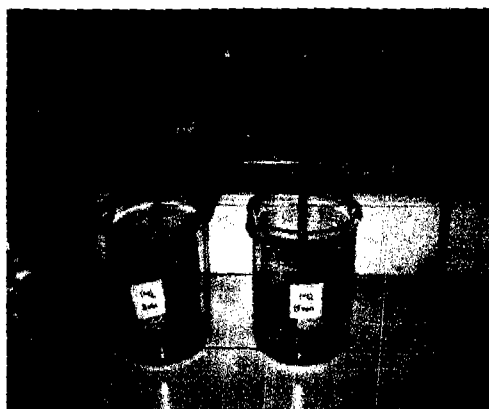
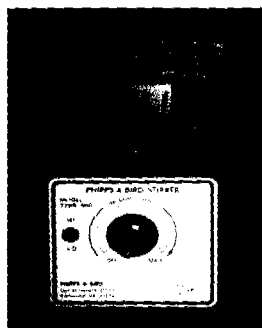


Figura 5. Controlador de mezcla



3.3. MUESTREO

La toma de las muestras del agua residual se realizó cada semana por un periodo de 2 meses, para realizar los respectivos análisis de laboratorio. La toma se realizó en frascos de vidrio para mantener en buen estado las

condiciones del agua y se transportaron de inmediato al Laboratorio de Calidad de aguas.

Para tener una idea de las condiciones del tratamiento, se puede observar la Figura 6:

Figura 6. Agua residual del Pozo séptico y agua del efluente del Humedal Artificial.



Los parámetros como el pH, conductividad, Temperatura, y Turbidez se midieron justo después de realizar la toma. Y otros parámetros como coliformes, cloro, fósforo, dureza, entre otros, se midieron en el transcurso del día.

Los ensayos se realizaron de acuerdo a los parámetros mencionados por las normas americanas Stándar Methods, por lo que se tuvo en cuenta: medición exacta de tiempos de espera con cronómetro, y medición exacta de volúmenes con los instrumentos adecuados, estos son, balones aforados y micropipeta.

4. RESULTADOS

Posterior a la realización de cada uno de los ensayos de laboratorio mencionados con anterioridad, se realizaron los cálculos respectivos para cada uno de los parámetros indicados. Los valores de las concentraciones obtenidas se consignaron en la Tabla 2 para la primera fase (Tratamiento en Humedal Artificial), indicando los resultados en el afluente y en el efluente del humedal.

Adicionalmente los datos se presentan de manera gráfica, para cada uno de los parámetros, teniendo una visión más clara de los resultados, los cuales se pueden ver detalladamente de la Figura 7 a la Figura 18.

El siguiente grupo de datos recolectados, corresponde a la fase II (Tratamiento por oxidación química), en donde se observan las concentraciones obtenidas para cada dosis aplicada y teniendo en cuenta la variación del tiempo.

VALORES OBTENIDOS AFLUENTE HUMEDAL ARTIFICIAL

PARAMETRO	NITRITOS	NITRATOS	Dureza Total	Dureza X Calcio	Dureza X Mg	Alcalinidad	Acidez	Fósforo	Cloruros	DBO 5	DQO	ST	SST	SDT	SSV	Coliformes Tot.	Conductividad	pH	Temperatura	Turbiedad	DBO 5000
MUESTRA 1	0,1	5,0	251,2	156,0	93,2	217,2	79,0	1,6	110,0	75	42,0	220,00	9,00	211,00	30,00	12.500	0,363	6,77	16,7	15,42	1,78571429
MUESTRA 2	0,1	5,0	313,6	162,0	151,8	218,0	84,0	1,1	100,0	58,0	32,0	300,0	88,57	231,4	80,00	294.000.000	0,363	6,8	16,8	12,5	1,8125
MUESTRA 3	0,1	5,0	307,8	146,4	181,4	219,4	77,4	1,6	105,0	60,0	32,0	75,7	20,00	55,7	7,14	19.500	0,289	6,78	16,1	1,95	1,87507032
MUESTRA 4	0,5	15,0	337,8	166,6	171,2	216,4	89,4	2,9	80,0	27,0	40,0	310,00	28,00	282,00	42,00	9.500	0,403	6,75	16,9	18,97	0,67502531
MUESTRA 5	0,1	10,0	357,8	169,8	187,8	229,0	166,0	1,9	120,0	148,0	180,0	200,00	57,00	143,00	54,00	44.000.000	0,395	7,47	17,1	10,53	0,92503469
MUESTRA 6	0,1	10,0	404,2	169,8	234,4	216,6	94,0	2,2	120,0	150,0	260,0	213,33	75,00	138,33	47,00	370.000	0,403	6,88	16,9	13,75	0,53573436

VALORES OBTENIDOS EFLUENTE HUMEDAL ARTIFICIAL

PARAMETRO	NITRITOS	NITRATOS	Dureza Total	Dureza X Calcio	Dureza X Mg	Alcalinidad	Acidez	Fósforo	Cloruros	DBO 5	DQO	ST	SST	SDT	SSV	Coliformes Tot.	Conductividad	pH	Temperatura	Turbiedad	DBO 5000
MUESTRA 1	0,5	35	231	151,8	79,2	131,4	35,2	0,518	89,98	41,8	104	139,5	16,187	123,33	59,50	1900	0,3876	7,88	15,8	0,1	0,40193815
MUESTRA 2	0,1	50	224,4	153,6	70,8	148	24,4	0,591	84,981	77,8	112	139,57	5,71	132,86	62,86	5000000	0,4712	7,88	15,1	0,1	0,63466891
MUESTRA 3	0,75	50	217	165,6	51,4	119,8	21	0,7	84,978	39,8	23,989	72,86	8,57	64,29	4,29	2200	0,2822	7,6	15,4	0,1	1,65839552
MUESTRA 4	0,7	10	216,4	157,2	58,2	147	46	0,773	88,984	48	23,999	192	31,5	160,5	40,50	1500	0,3288	7,78	15,5	0,1	2,000075
MUESTRA 5	0,1	35	279,2	152,6	126,6	148,2	58,2	1,315	109,96	95	38,998	198,17	10,5	185,67	22,50	8000000	0,3306	8,08	15,8	0,1	2,12507969
MUESTRA 6	1	50	287,8	152,6	145,2	107,2	36,6	0,345	58,986	128,8	271,99	132,83	4,5	128,33	17,50	12000	0,4104	7,08	15,4	1,32	0,47722378

Tabla 2. Datos obtenidos para el efluente y el afluente del Humedal Artificial de Flujo Vertical

4.1. RESULTADOS FASE I: TRATAMIENTO POR MEDIO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL

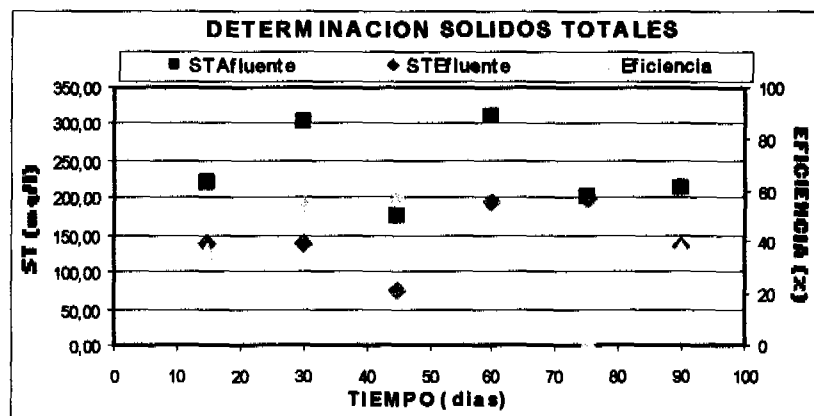
4.1.1 Parámetros Físicos

Toda agua de tipo residual posee unas características físicas propias tales, como la temperatura, el color, el olor, los sólidos, entre otros. La más importante corresponde al contenido total de sólidos, el cual está compuesto por materia flotante y materia en suspensión, en dispersión y en solución.

Tabla 3. Valores obtenidos en la determinación de Sólidos Totales

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	mg/l	220,00	300,0	175,7	310,00	200,00	213,33
EFLUENTE	mg/l	139,5	139	72,9	192	196,17	132,83

Figura 7. Comportamiento Sólidos Totales.



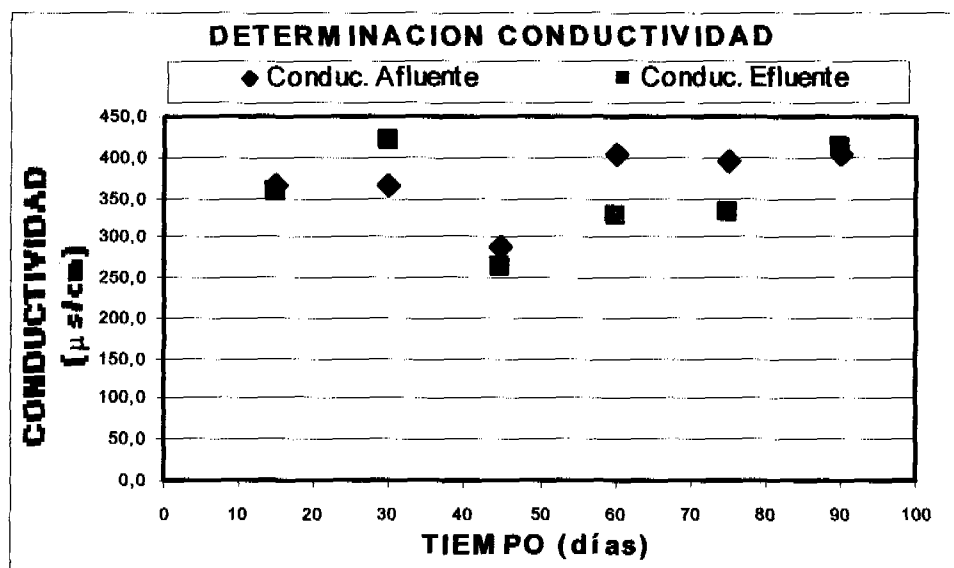
Los Sólidos Totales de un agua residual corresponden a todo material flotante o materia en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución. Estos incluyen los sólidos suspendidos y filtrables, y además los sedimentables y no sedimentables para cada uno de ellos.

Para el agua tratada se obtuvo una cantidad baja de sólidos totales, respecto a los valores típicos de un agua residual doméstica. Sin embargo la remoción no sobrepasa el 60%.

Tabla 4. Valores obtenidos en la determinación de la Conductividad

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	$\mu\text{s/cm}$	363,3	363,3	288,8	402,8	395,2	402,8
EFLUENTE	$\mu\text{s/cm}$	358,0	421,0	262,2	326,8	330,6	410,4

Figura 8. Comportamiento de la Conductividad.



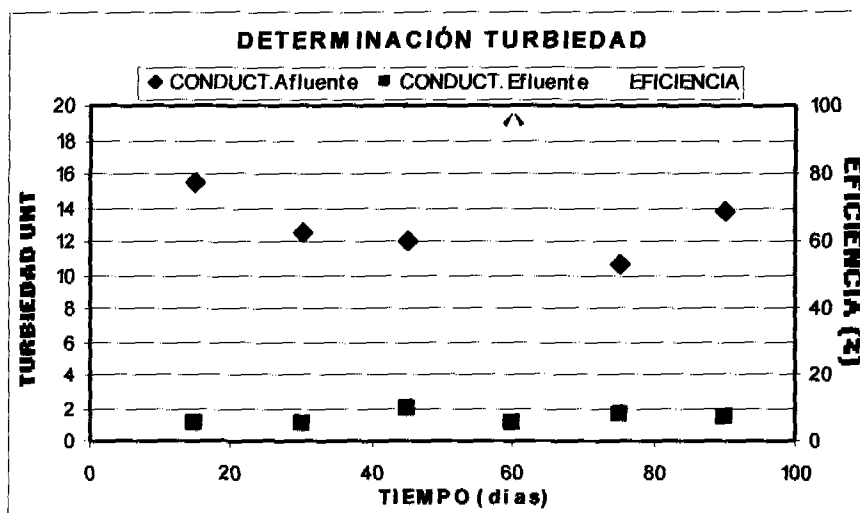
La conductividad del agua indica la capacidad de ésta para conducir calor o electricidad. Pero principalmente está relacionada con el grado de salinidad de la misma, lo que resulta de gran importancia en el estudio del reuso en agricultura.

Para el agua tratada, el valor de la conductividad no varía de manera considerable, es decir, se mantiene constante.

Tabla 5. Valores obtenidos en la determinación de la Turbiedad

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	UNT	15,42	12,5	12,0	18,97	10,53	13,75
EFLUENTE	UNT	1	1	2	1	1,5	1,32

Figura 9. Comportamiento de la Turbiedad

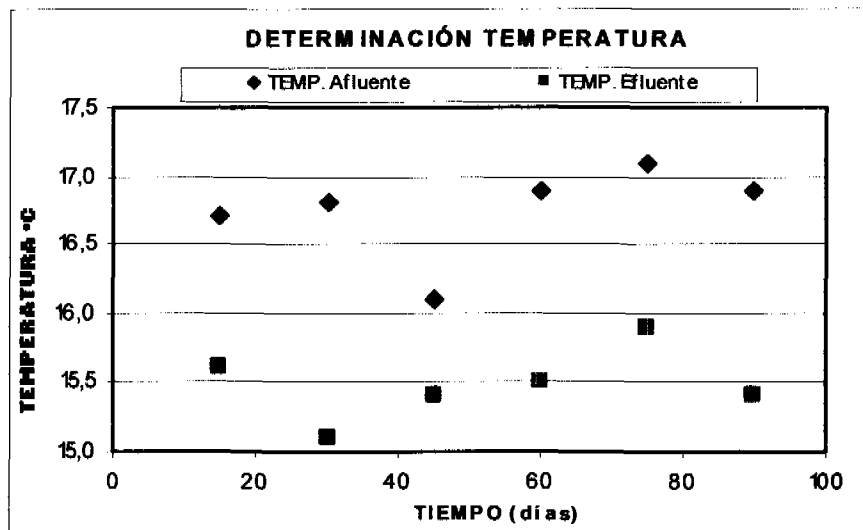


El parámetro de la turbiedad indica la calidad de los vertidos de aguas residuales y aguas naturales con respecto a la materia coloidal. Durante el proceso se observó su disminución de manera considerable, de acuerdo con los porcentajes de remoción mayores al 80%:

Tabla 6. Valores obtenidos en la determinación de la Temperatura

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	°C	16,70	16,8	16,1	16,90	17,10	16,90
EFLUENTE	°C	15,6	15,1	15,4	15,5	15,9	15,4

Figura 10. Comportamiento de la Temperatura

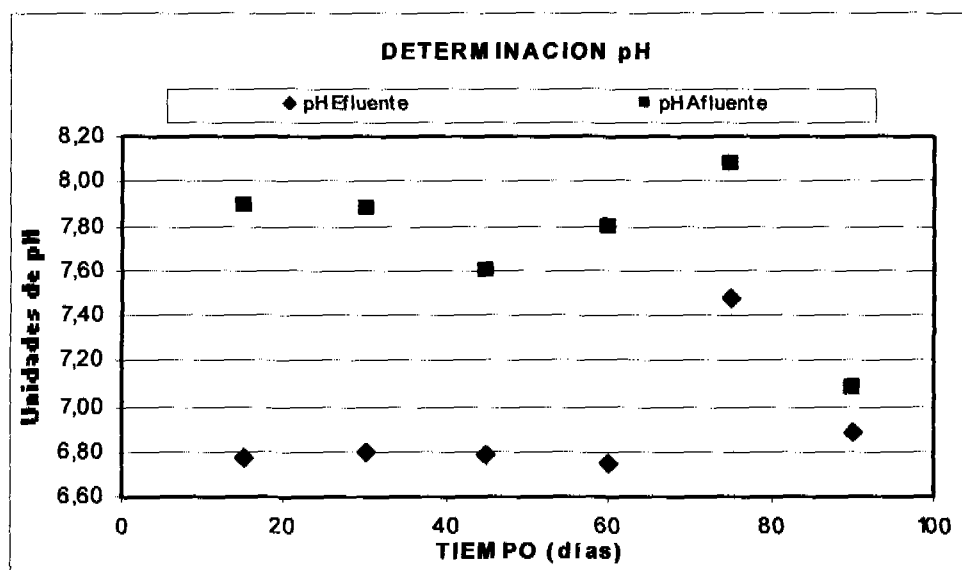


La temperatura del agua de estudio disminuyó durante el proceso debido al contacto del agua con el lecho filtrante y con las plantas, y por las condiciones externas cambiantes del sitio de ubicación que afectan dicha propiedad.

Tabla 7. Valores obtenidos en la determinación del pH

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	Unid.pH	6,77	6,8	6,8	6,75	7,47	6,88
EFLUENTE	Unid.pH	7,89	7,88	7,6	7,79	8,08	7,08

Figura 11. Comportamiento del pH



La concentración del ión hidrógeno (pH) es un importante parámetro de la calidad de las aguas residuales, por ejemplo para mantener favorable el proceso de los organismos.

Durante los ensayos se obtuvieron valores de tipo ácido ($\text{pH} < 7$) en el afluente, y luego del tratamiento, es decir, en el efluente, resultaron valores de tipo alcalina ($\text{pH} > 7$). Esto permitiendo predecir el tipo de uso que puede dársele al agua tratada en términos de pH.

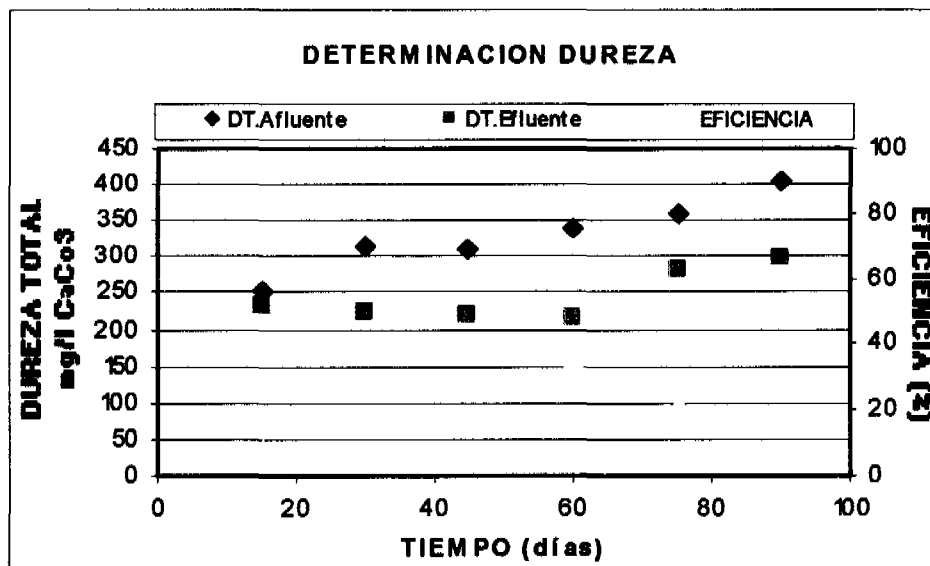
4.1.2 Parámetros Químicos

La caracterización química de un agua residual pretende principalmente conocer los contenidos de materia orgánica, contenido orgánico, materia inorgánica y gases presentes en el agua residual.

Tabla 8. Valores obtenidos en la determinación de Dureza

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	mg/l CaCO_3	251,20	313,6	307,8	337,80	357,60	404,20
EFLUENTE	mg/l CaCO_3	231	224,4	217	216,4	279,2	297,8

Figura 12. Comportamiento de la Dureza



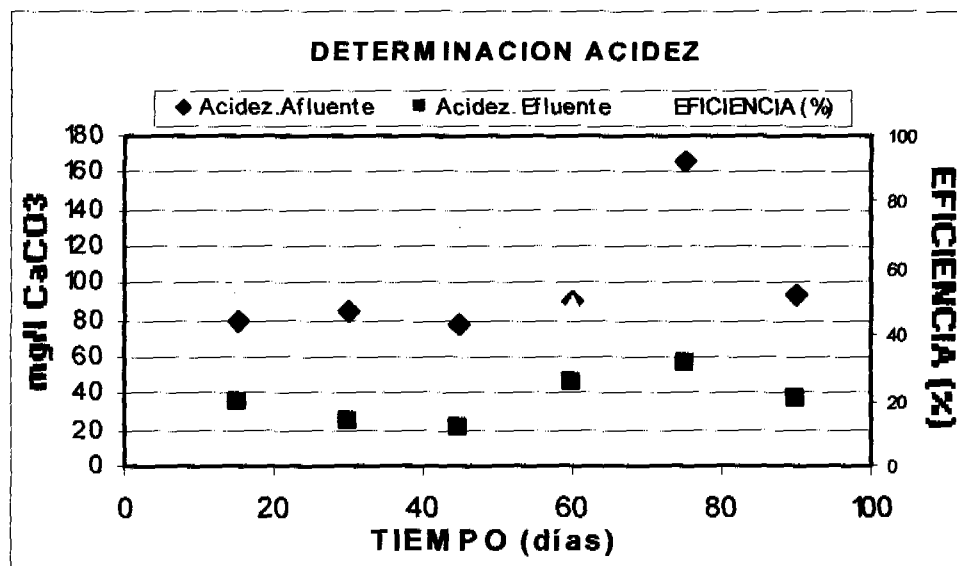
La dureza presente en el agua es causada por las sales de calcio y de magnesio. Para esta investigación resulta de gran importancia teniendo en cuenta que uno de los análisis corresponde al reuso del agua tratada en agricultura, en donde se hace necesario el control de los iones en el agua.

En el agua tratada, la reducción esta alrededor del 40%, esto podría indicar que el sistema durante su operación tiene mucha probabilidad de lavar sales presentes en el sustrato (arrastre).

Tabla 9. Valores obtenidos en la determinación de Acidez

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	mg/l CaCO_3	79,00	84,0	77,4	89,40	166,00	94,00
EFLUENTE	mg/l CaCO_3	35,2	24,4	21	46	56,2	36,6

Figura 13. Comportamiento de la Acidez.



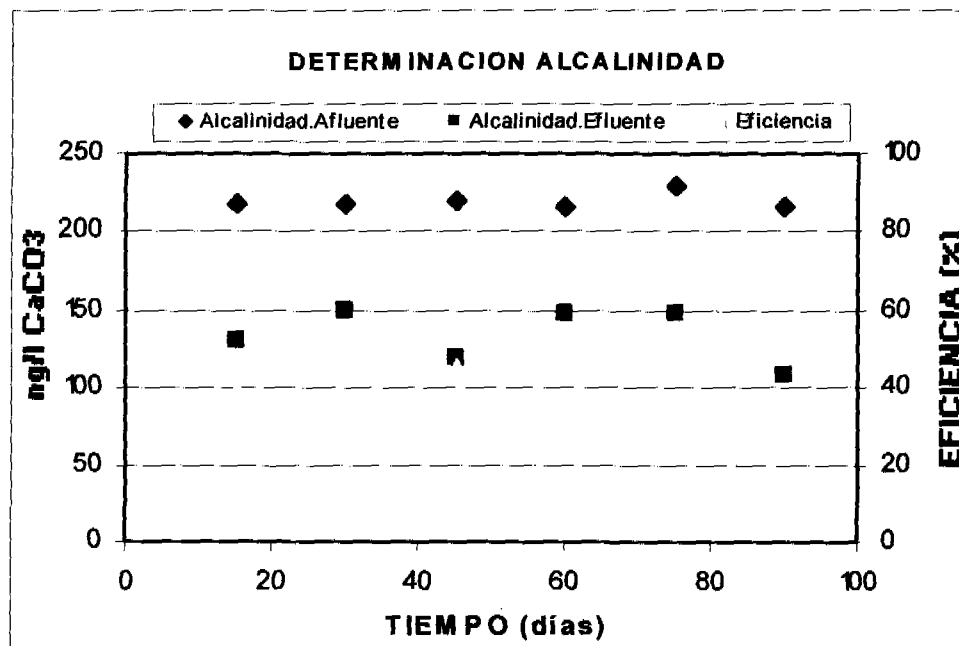
La acidez, es una propiedad causada por el dióxido de carbono o por los ácidos minerales fuertes. Puede tener efectos nocivos en su uso.

Para este proyecto se registró una disminución favorable, con rangos entre el 50 y el 80%.

Tabla 10. Valores obtenidos en la determinación de Alcalinidad

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	mg/l CaCO ₃	217	218	219	216	229	217
EFLUENTE	mg/l CaCO ₃	131	149	120	147	148	107

Figura 14. Comportamiento de la Alcalinidad

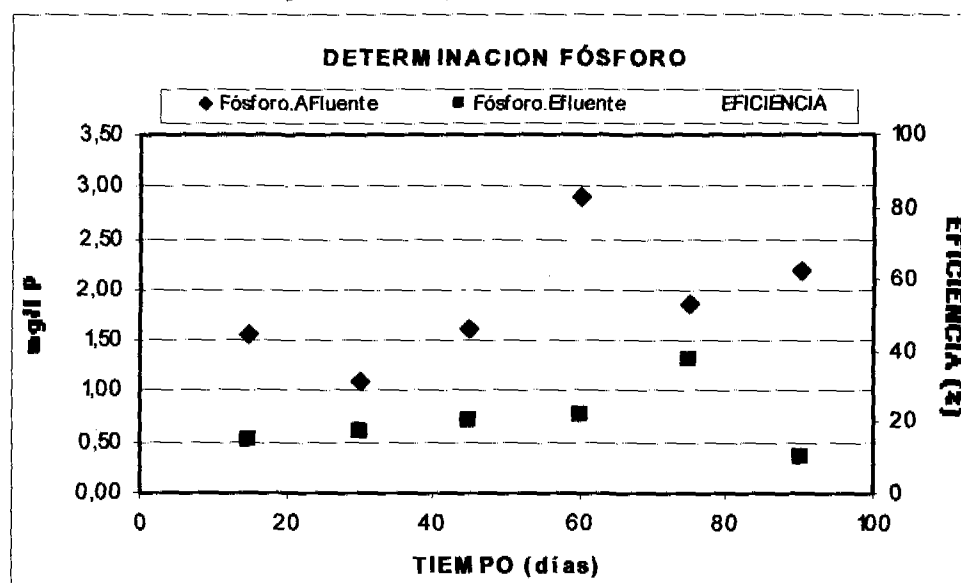


La alcalinidad en el agua residual se debe a la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como calcio, sodio, potasio o amoníaco. El tratamiento por medio del humedal disminuye este valor en porcentajes del 30 al 40%. Lo que se observa es que el sistema tiene la capacidad de amortiguar ácidos, permaneciendo alcalinizado, esto favoreciendo la reducción de nitrógeno.

Tabla 11. Valores obtenidos en la determinación de Fósforo

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	mg/l PO ₄	1,57	1,1	1,6	2,90	1,85	2,20
EFLUENTE	mg/l PO ₄	0,518	0,591	0,700	0,773	1,315	0,345

Figura 15. Comportamiento del Fósforo.



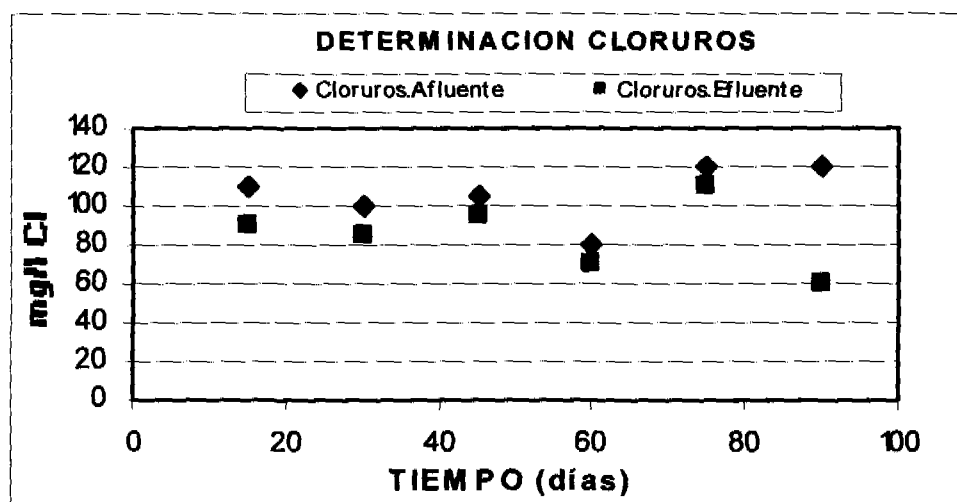
El fósforo presente en el agua residual, proviene de los detergentes o sustancias tensoactivas, y al igual que el nitrógeno, es esencial para el crecimiento de los organismos biológicos.

En el tratamiento se obtuvo una remoción importante de fósforo, por lo que habría que considerar la cantidad necesaria en el caso del reuso, ya que la adición de fósforo es de gran importancia como nutriente en las actividades agrícolas.

Tabla 12. Valores obtenidos en la determinación de Cloruros

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	mg/l Cl	109,98	100,0	105,0	79,98	119,97	119,97
EFLUENTE	mg/l Cl	89,98	84,98	94,98	69,98	109,98	59,99

Figura 16. Comportamiento de Cloruros



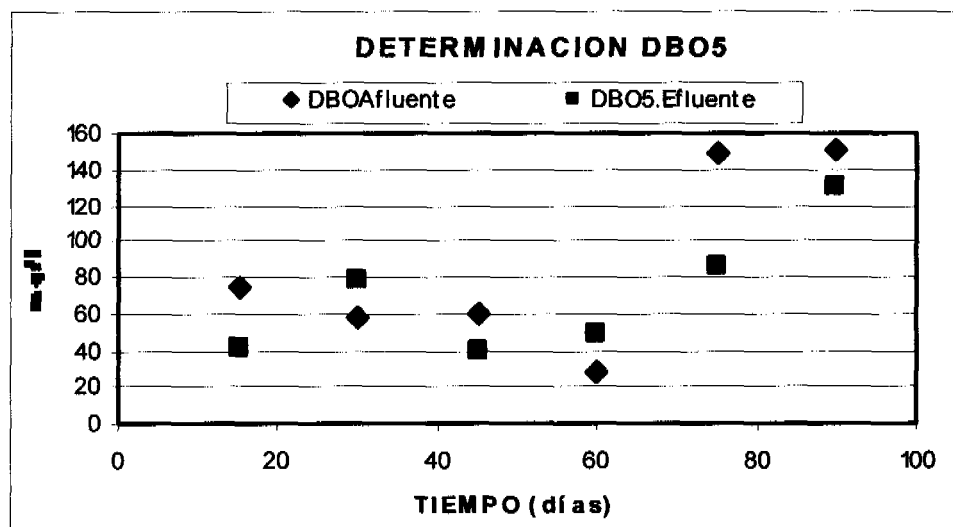
El contenido de cloruros en el agua residual proviene en cierta cantidad de la orina de las descargas domésticas. Por medio de métodos convencionales, la eliminación de cloruros no es significativa.

El porcentaje de remoción es bajo para el tratamiento utilizado, pero el valor no infiere riesgos ambientales ni de la salud humana.

Tabla 13. Valores obtenidos en la determinación de DBO5

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	mg/l	75,00	58,0	60,0	27,00	148,00	150,00
EFLUENTE	mg/l	41,80	77,80	39,80	48,00	85,00	129,80

Figura 17. Comportamiento de la DBO5.

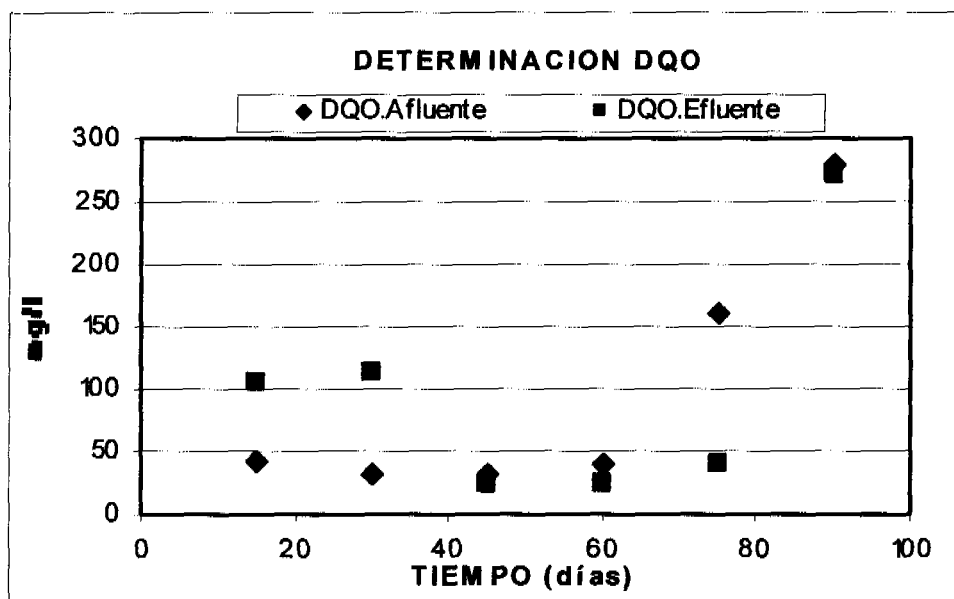


La demanda Bioquímica de Oxígeno DBO, es la medida indirecta de la materia orgánica biodegradable presente en un cuerpo de agua. Según los valores obtenidos, la remoción de DBO5 es baja, por lo que se supone habrá oxígeno disponible para que los microorganismos oxiden la materia orgánica haciendo mas efectivo el tratamiento.

Tabla 14. Valores obtenidos en la determinación de DQO

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	mg/l	42,00	32,0	32,0	40,00	159,99	279,99
EFLUENTE	mg/l	104,00	112,00	24,00	24,00	40,00	271,99

Figura 18. Comportamiento de la DQO



La Demanda Química de Oxígeno DQO, permite determinar el contenido de materia orgánica, o la cantidad total de oxígeno requerido para su oxidación. La remoción es similar al de la DBO, indicando que si ocurre la oxidación de la materia.

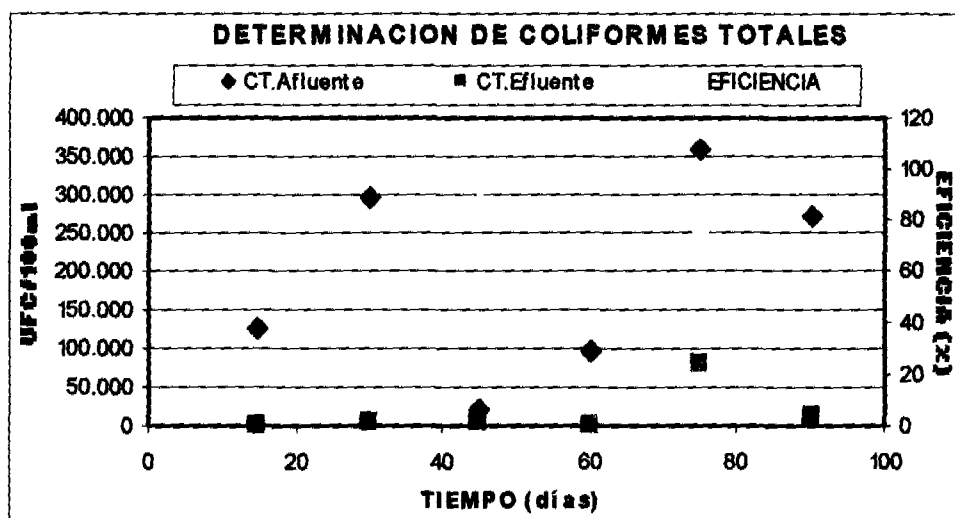
4.1.3 Parámetros Microbiológicos

El agua residual adicionalmente está compuesta por grupos de microorganismos que intervienen en el tratamiento biológico, y sirven como indicadores de contaminación.

Tabla 15. Valores obtenidos en la determinación de Coliformes Totales

TIEMPO OPERACIÓN	(días)	15	30	45	60	75	90
AFLUENTE	UFC	125.000	294.000	19.500	95.000	360.000	270.000
EFLUENTE	UFC	1.800	5.000	2.200	1.500	80.000	12.000

Figura 19. Comportamiento Coliformes Totales



Los Organismos Coliformes pertenecen al grupo de las bacterias presentes en el agua residual, por descarga directa desde el tracto intestinal del hombre. Este se utiliza como mecanismo indicador por encontrarse en manera numerosa y por su fácil determinación.

Es claro que la disminución de coliformes es casi completa por medio del tratamiento, haciendo eficiente el sistema para éste parámetro.

4.2. RESULTADOS FASE II: TRATAMIENTO POR MEDIO DE LA APLICACIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO

Para la fase II del tratamiento del agua residual, se realizó el muestreo en el efluente del Humedal Artificial, midiendo directamente los valores de pH, Temperatura, Conductividad y posteriormente los valores de Fósforo, Cloro Total, Coliformes fecales. Luego de la aplicación del Hipoclorito y del paso del tiempo de contacto, se midieron de igual manera los parámetros antes mencionados para conocer su comportamiento a medida que se aumentaba la dosis de hipoclorito y el tiempo de contacto. Los valores obtenidos se observan en las tablas 16 a la 20.

Tabla 16. Datos obtenidos para dosis de 1 mg/l de NaOCl

FECHA Enero/24/2007		CONCENTRACION 1mg/l				
PARAMETRO	UNID	AFLUENTE	NaOCl (5 min)	NaOCl (15 min)	NaOCl (30 min)	NaOCl (45 min)
pH		7,55	7,65	7,6	7,64	7,66
Temperatura	°C	17,6	13,8	15,2	15,1	16,1
Conductividad	μs	509,2	539,6	520,6	547,2	539,6
Fósforo	mg/l	0,57426	0,38674	0,44291	0,35654	0,62912
Coliformes	UFC	48	4	2	3	6
Cloro Total	mg/l	0	0	0,2	0	0
Cloro Libre	mg/l	0	0	0	0	0
Cloro Combinado	mg/l	0	0	0,2	0	0
Turbiedad	UNT	47	66	60	50	47

Tabla 17. Datos obtenidos para dosis de 2 mg/l de NaOCl

FECHA: Dic/06/2006		CONCENTRACION 2mg/l				
PARAMETRO	UNID	AFLUENTE	NaOCl (5 min)	NaOCl (15 min)	NaOCl (30 min)	NaOCl (45 min)
pH		7,03	7,05	7,07	7,16	7,18
Temperatura	°C	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8
Conductividad	μs	391,4	402,8	448,4	501,6	433,2
Fósforo	mg/l	0,552	0,39594	0,41453	0,45894	0,29267
Coliformes	UFC	1,4E+04	1,2E+03	4,0E+02	3,0E+02	2,0E+02
Cloro Total	mg/l	0	1,5	5	6	1,3
Cloro Libre	mg/l	0	0,2	0,5	0,4	0,3
Cloro Combinado	mg/l	0	1,3	4,5	5,6	1
Turbiedad	UNT	25	32	30	28	30

Tabla 18. Datos obtenidos para dosis de 4 mg/l de NaOCl

FECHA: Enero/25/2007		CONCENTRACION 4mg/l				
PARAMETRO	UNID	AFLUENTE	NaOCl (5 min)	NaOCl (15 min)	NaOCl (30 min)	NaOCl (45 min)
pH		7,13	7,14	7,23	7,26	7,3
Temperatura	°C	17,4	17,6	17,7	17,6	17
Conductividad	μs	433,2	433,3	463,6	513	520,6
Fósforo	mg/l	0,66533	0,40211	0,53497	0,79777	0,30688
Coliformes	UFC	2,4E+04	2,0E+02	2,0E+02	1,0E+02	3,0E+02
Cloro Total	mg/l	0	0,5	2,7	2,4	3
Cloro Libre	mg/l	0	0,1	0,3	0,3	0,4
Cloro Combinado	mg/l	0	0,4	2,4	2,1	2,6
Turbiedad	UNT	45	46	41	30	23

Tabla 19. Datos obtenidos para dosis de 6 mg/l de NaOCl

FECHA: Dic/06/2006		CONCENTRACION 6mg/l				
PARAMETRO	UNID	AFLUENTE	NaOCl (5 min)	NaOCl (15 min)	NaOCl (30 min)	NaOCl (45 min)
pH		8,33	8,33	8,33	8,33	8,33
Temperatura	°C	17	17,1	17	17,1	17
Conductividad	μs	532	543,4	558,6	547,2	551
Fósforo	mg/l	0,4052	0,45894	0,56922	0,59715	0,62196
Coliformes	UFC	1,6E+04	3,0E+02	1,0E+02	0,0E+00	4,0E+02
Cloro Total	mg/l	0	0,2	0,7	0,3	0,3
Cloro Libre	mg/l	0	0,1	0,1	0,2	0,1
Cloro Combinado	mg/l	0	0,1	0,6	0,1	0,2
Turbiedad	UNT	24	25	26	27	26

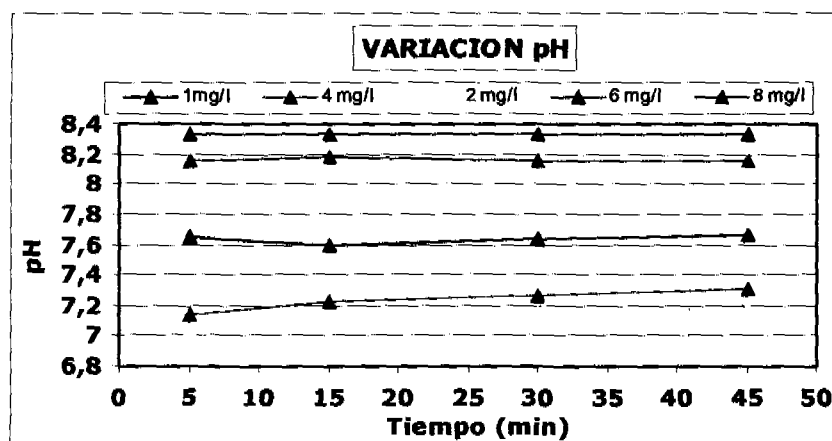
Tabla 20. Datos obtenidos para dosis de 8 mg/l de NaOCl

FECHA: Dic/06/2006		CONCENTRACION 8mg/l				
PARAMETRO	UNID	AFLUENTE	NaOCl (5 min)	NaOCl (15 min)	NaOCl (30 min)	NaOCl (45 min)
pH		8,13	8,15	8,18	8,16	8,15
Temperatura	°C	17,3	17,3	17,4	17,5	17,6
Conductividad	μs	600,4	608	614,9	615,6	612,6
Fósforo	mg/l	0,62553	0,46216	0,62912	0,59363	0,62196
Coliformes	UFC	2,7E+04	0,0E+00	0,0E+00	1,0E+02	0,0E+00
Cloro Total	mg/l	0	0,8	0,5	0,2	1,7
Cloro Libre	mg/l	0	0,1	0,1	0,1	0,3
Cloro Combinado	mg/l	0	0,7	0,4	0,1	1,4
Turbiedad	UNT	24	34	35	36	37

Tabla 21. Valores obtenidos de pH por dosis de NaOCl

DOSIS	AFLUENTE	NaOCl (5 min)	NaOCl (15 min)	NaOCl (30 min)	NaOCl (45 min)
1 mg/l	7,55	7,65	7,6	7,64	7,66
2 mg/l	7,03	7,05	7,07	7,16	7,18
4 mg/l	7,13	7,14	7,23	7,26	7,3
6 mg/l	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33
8 mg/l	8,13	8,15	8,18	8,16	8,15

Figura 20. Variación del pH para varias dosis.

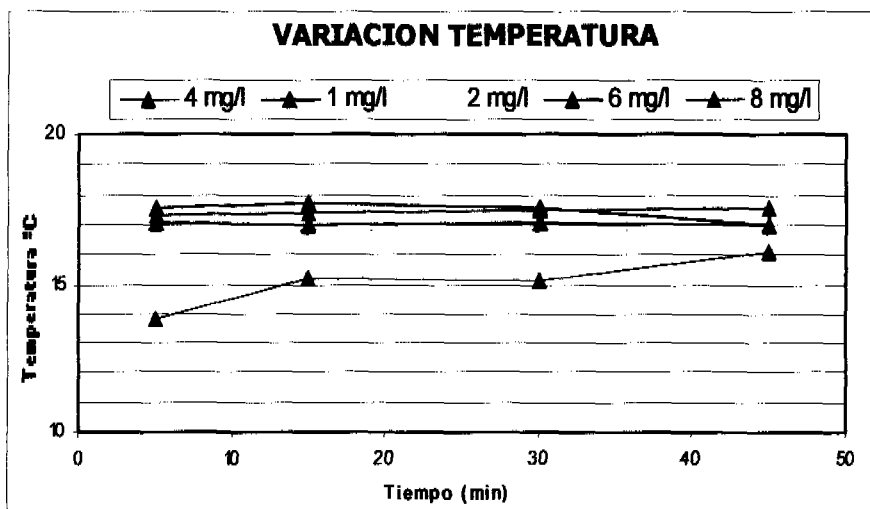


Durante el ensayo se encontraron valores de pH entre 7.03 y 8.33 en el afluente, y posterior a la aplicación del Hipoclorito de sodio, el pH fue aumentando moderadamente, pero encontrándose siempre en un rango alcalino.

Tabla 22. Valores obtenidos de Temperatura por dosis de NaOCl

DOSIS	AFLUENTE	NaOCl (5 min)	NaOCl (15 min)	NaOCl (30 min)	NaOCl (45 min)
1 mg/l	17,6	13,8	15,2	15,1	16,1
2 mg/l	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8
4 mg/l	17,4	17,6	17,7	17,6	17
6 mg/l	17	17,1	17	17,1	17
8 mg/l	17,3	17,3	17,4	17,5	17,6

Figura21. Variación de la temperatura para varias dosis

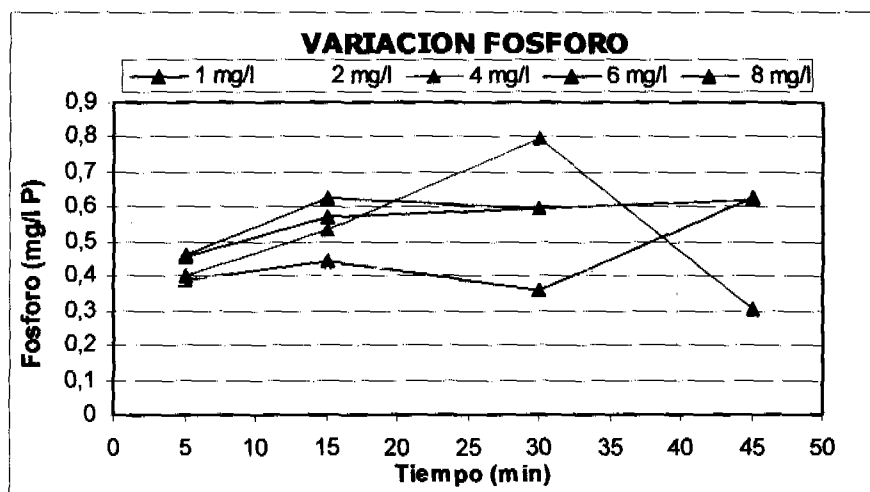


La temperatura del agua no varió considerablemente, es decir, se mantuvo en 17.4°C aproximadamente. Su comportamiento varió después de realizar la mezcla continua en los bikers de ensayo, presentándose un aumento pausado. Algunas variaciones del ensayo pueden deberse al comportamiento de la temperatura del medio ambiente.

Tabla 23. Valores obtenidos de Fósforo PO₄ para cada dosis de NaOCl

DOSIS	AFLUENTE	NaOCl (5 min)	NaOCl (15 min)	NaOCl (30 min)	NaOCl (45 min)
1 mg/l	0,57426	0,38674	0,44291	0,35654	0,62912
2 mg/l	0,552	0,39594	0,41453	0,45894	0,29267
4 mg/l	0,66533	0,40211	0,53497	0,79777	0,30688
6 mg/l	0,4052	0,45894	0,56922	0,59715	0,62196
8 mg/l	0,62553	0,46216	0,62912	0,59363	0,62196

Figura22. Variación del fósforo para varias dosis



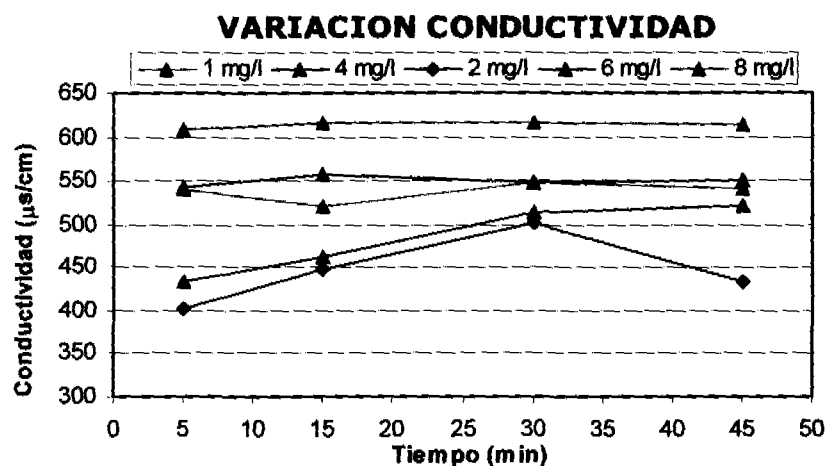
El comportamiento de la concentración de fósforo varió en pequeñas cantidades por medio de aumentos y disminuciones, sin importar la adición del Hipoclorito ni el tiempo de contacto.

Este parámetro permite deducir la presencia de nutrientes en el agua y es apto para la determinación de la calidad del agua para reuso agrícola.

Tabla 24. Valores obtenidos de Conductividad para cada dosis de NaOCl

DOSIS	AFLUENTE	NaOCl (5 min)	NaOCl (15 min)	NaOCl (30 min)	NaOCl (45 min)
1 mg/l	509,2	539,6	520,6	547,2	539,6
2 mg/l	391,4	402,8	448,4	501,6	433,2
4 mg/l	433,2	433,3	463,6	513	520,6
6 mg/l	532	543,4	558,6	547,2	551
8 mg/l	600,4	608	614,9	615,6	612,6

Figura23. Variación de la Conductividad para varias dosis



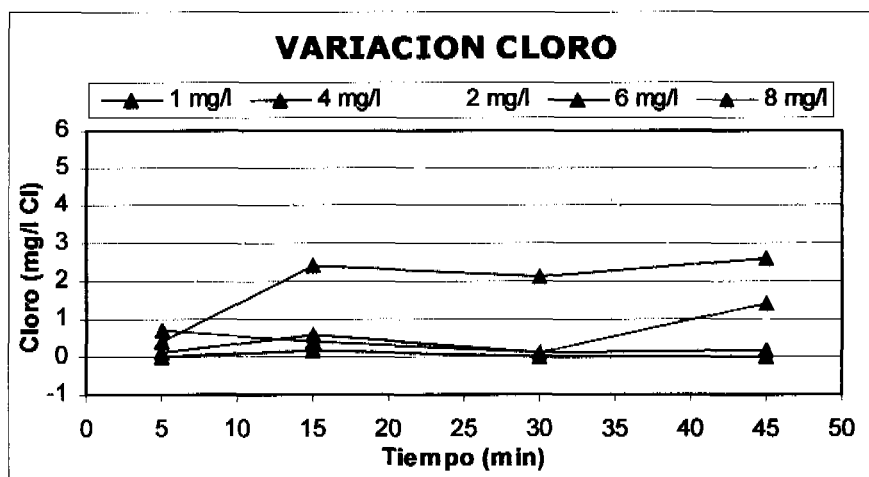
La conductividad es un parámetro de gran importancia en la determinación de la calidad del agua para reuso agrícola, de acuerdo con su relación respecto al grado de salinidad del agua.

Para éste ensayo, los valores de conductividad aumentaron al tiempo en que se aumentaba la dosis de Hipoclorito de sodio.

Tabla 25. Valores obtenidos de Cloro Total por cada dosis de NaOCl

DOSIS	AFLUENTE	NaOCl (5 min)	NaOCl (15 min)	NaOCl (30 min)	NaOCl (45 min)
1 mg/l	NR	0	0,2	0	0
2 mg/l	NR	1,3	4,5	5,6	1
4 mg/l	NR	0,4	2,4	2,1	2,6
6 mg/l	NR	0,1	0,6	0,1	0,2
8 mg/l	NR	0,3	1,8	2	2,4

Figura 24. Variación del Cloro Total para varias dosis



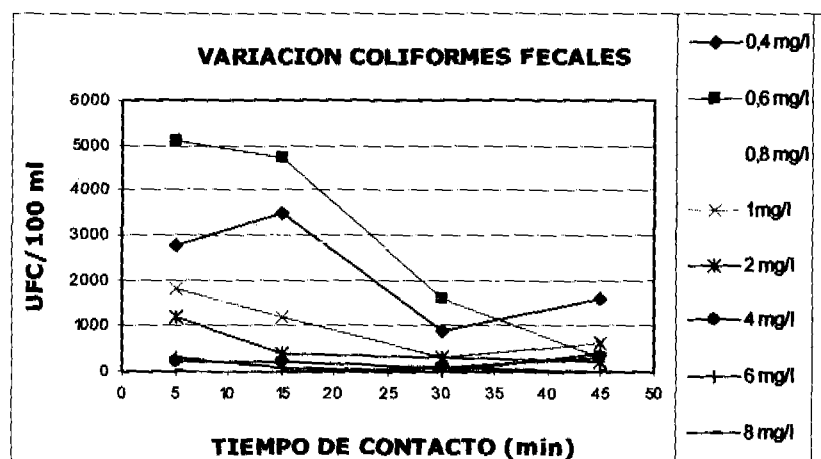
El cloro presente en el agua se representa por medio del cloro combinado, que equivale a la suma de los valores del cloro libre con el cloro residual.

Para éste ensayo no se encontraron valores de cloro en el pozo séptico, o eran muy pequeños, lo que hace al valor No Reportable. Luego de la aplicación del Hipoclorito al agua, entonces si se reportaron valores para cloro residual. Los valores para la dosis de 2 mg/l, no tienen un comportamiento correcto, por lo que puede ser descartada del análisis.

Tabla 26. Valores obtenidos de Coliformes fecales por dosis de NaOCl

	0,4 mg/l	0,6 mg/l	0,8 mg/l	1mg/l	2 mg/l	4 mg/l	6 mg/l	8 mg/l
Afluente	9800	15300	24000	7800	14400	24000	16400	26600
5 min	2800	5100	4200	1800	1200	200	300	0
15 min	3500	4700	2900	1200	400	200	100	0
30 min	900	1600	2600	300	300	100	0	100
45 min	1600	300	700	600	200	300	400	0

Figura 25. Variación Coliformes Fecales para varias dosis



Teniendo en cuenta que para éste ensayo, el organismo indicador son los coliformes fecales, entonces se realizaron dosis adicionales de cloro, para obtener un comportamiento más amplio y poder analizar mejor los resultados. En general se encontraron importantes disminuciones de coliformes por la aplicación del Hipoclorito de Sodio al agua de estudio.

4.3. ANALISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con todos los valores registrados y por medio de un análisis estadístico a través de tablas y figuras, se puede realizar una valoración del ensayo para cada una de las fases adaptadas en el tratamiento del agua residual.

4.3.1. FASE I: Tratamiento por medio del Humedal Artificial de Flujo Vertical

Para esta fase se realizaron ensayos de caracterización físico-química y microbiológica del agua proveniente del pozo séptico del edificio C de la Universidad Militar, y de acuerdo con los valores obtenidos se pueden deducir varias cosas.

- La variación de los valores obtenidos se afectó en distintos tiempos de acuerdo a la utilización de las baterías de baños del edificio C, es decir, su comportamiento dependió de la afluencia de estudiantes a este lugar y por ende la obtención de características específicas a lo largo del tiempo de estudio.
- La caracterización física del agua residual arrojó valores de eficiencia óptimos (>80%) para la turbiedad, eficiencia media para los sólidos totales y para el pH (40%-60%) y no se registraron variaciones en conductividad y temperatura. Los parámetros físicos permiten principalmente valorar el sistema en su comportamiento estético.
- Respecto al comportamiento en el tiempo, se encontraron aumentos considerables de los valores físicos en el rango de 60 a 75 días, en que muy seguramente se presentó mayor descarga residual del edificio C de la

universidad. El resto del tiempo de estudio tuvo un comportamiento constante.

- Las variaciones de pH y Temperatura permiten deducir las condiciones aptas con las que el agua entre y sale del sistema, lo que posibilita determinar la calidad del agua para posteriores tratamientos o reuso directo de la misma.
- Las propiedades químicas del agua al igual que las físicas, presentaron valores altos en el afluente cerca del día 75 de operación, confirmando el aumento de la carga residual en éste periodo.
- La reducción de fósforo aumentó notablemente hasta el día 60, confirmando la activación de los procesos de filtración, sedimentación, absorción y asimilación por las plantas dentro del sistema.
- El comportamiento de los nitritos y los nitratos no presentó disminución, lo que infiere que no se realizan procesos de nitrificación/desnitrificación en el sistema, o que su aumento se debe a un lavado de aquellos que se encuentran en el lecho.
- Siendo la Dureza Total el equivalente a las concentraciones de los iones Calcio y Magnesio presentes en el agua, para el agua de estudio se encuentra que el sistema remueve la dureza pero en porcentajes menores al 40%, es decir, podría estabilizarse para permitir el paso de estos iones al reuso en agricultura, por ejemplo el riego de cultivos, logrando el mejoramiento del suelo, y aumentando su permeabilidad.
- Se visualiza de acuerdo a los valores de acidez y alcalinidad, que el agua residual contiene mayor cantidad de carbonatos y bicarbonatos que de minerales. Respecto a la eficiencia de remoción, los valores de acidez

disminuyeron en porcentajes entre el 60% y el 70% y los de alcalinidad entre 30% y 40 %, permitiendo observar que el sistema mantiene constante las concentraciones de bicarbonatos ya sea de tipo magnésico o cálcico, lo cual es favorable para el reuso del agua en el riego de cultivos.

- El comportamiento de Cloruros es deficiente en el sistema sin embargo sus efectos inorgánicos se describen como la presencia de un sabor salado en el agua y posible interferencia en procesos de tipo industrial, lo que permite descartar su afectación negativa en el reuso para riego en agricultura.
- Los valores de DBO5, DQO y coliformes fecales permiten estudiar el comportamiento de la reducción de la materia orgánica presente en el agua residual de manera indirecta. Para el agua tratada se observa un aumento considerable después del día 75 de operación de la materia orgánica, lo cual debió afectar al sistema en este periodo.
- Se observan que la mayoría de los compuestos presentes en al agua se pueden oxidar por vía biológica y no por vía química, teniendo en cuenta que la DBO resultó mayor que la DQO.
- Los Coliformes totales tuvieron su mayor aumento hacia el día 75 de operación, pero el sistema en general tuvo remociones favorables. Sin embargo se debe tener en cuenta que no se realizaron ensayos para la determinación del grupo de microorganismos indicadores de contaminación fecal.

4.3.2. FASE II: Tratamiento medio de la Aplicación de Hipoclorito de Sodio

De acuerdo con los resultados obtenidos de coliformes fecales como organismo indicador, para cada dosis aplicada se realizó el estudio de la cinética de decaimiento utilizando los modelos planteados por : Chick, Watson y Hom.

a) Ley de Chick

Teniendo en cuenta que ésta teoría estudia las variables de la concentración de microorganismos y una constante de decaimiento, suponiendo una concentración homogénea y mezcla completa, se procedió a realizar la gráfica de los valores obtenidos y una regresión de tipo lineal para obtener la constante de decaimiento y así poder analizar posteriormente la efectividad del sistema. De tal manera:

Teniendo en cuenta el enunciado de ésta ley:

$$\frac{dN}{dt} = -K * N_0 \quad \text{Ecuación 5}$$

En donde:

N_0 = Concentración de microorganismos inicial (UFC/100 ml)

K = Constante de decaimiento (1/T)

Que equivale a la siguiente expresión:

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -K * t \quad \text{Ecuación 6}$$

Una primera aproximación se puede realizar de manera gráfica por medio de la relación del $\ln(N/N_0)$ vs. el tiempo de mezcla.

Tabla 27. Valores obtenidos de $\ln(N/N_0)$ para cada dosis según Modelo de Chick

LEY DE CHICK							
$\ln(N/N_0)$							
TIEMPO	0,4 mg/l	0,6 mg/l	0,8 mg/l	1mg/l	2 mg/l	4 mg/l	6 mg/l
0	0	0	0	0	0	0	0
5	-1,25276	-1,09861229	-1,74296931	-1,46633707	-2,48490665	-4,78749174	-4,00125414
15	-1,02962	-1,18029032	-2,11334309	-1,87180218	-3,58351894	-4,78749174	-5,09986643
30	-2,38774	-2,2578492	-2,22254239	-3,25809654	-3,87120101	-5,48063892	-9,70503661
45	-1,81238	-3,93182563	-3,53472877	-2,56494936	-4,27666612	-4,38202663	-3,71357207

Los valores de N corresponden a las unidades formadoras de colonias obtenidas en la Tabla 26, y los de N_0 equivalen al valor de coliformes fecales en el afluente del sistema.

Figura 26. Relación $\ln(N/N_0)$ vs Tiempo de contacto

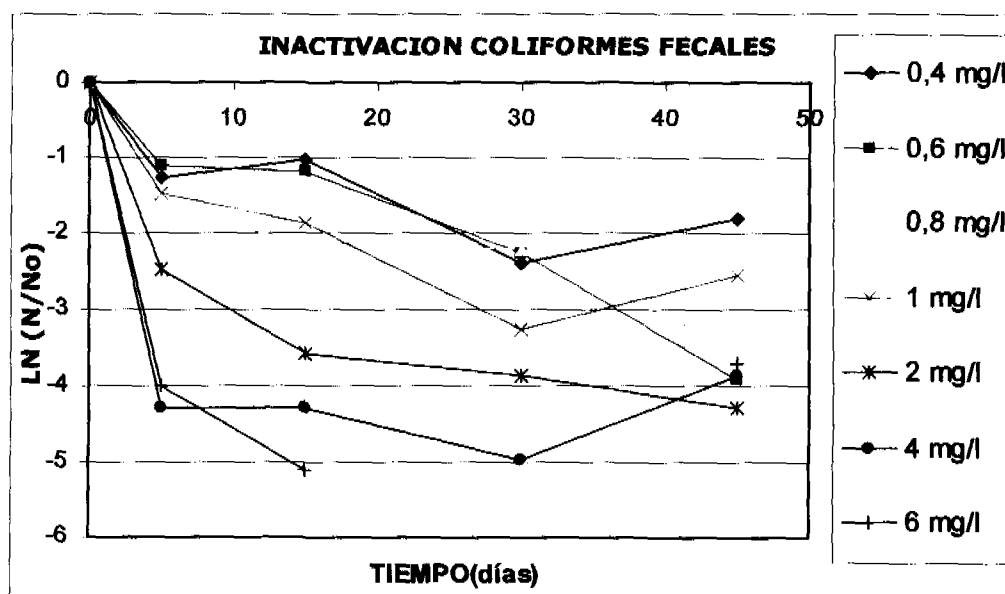


Tabla 28. Valores de las constantes de decaimiento obtenidos por regresión para el modelo de Chick.

DOSIS	K	R2	Ecuación
0,4	-0,05508581	0,49610262	$\frac{N}{N_0} = e^{-0.055085 \cdot t}$
0,6	-0,08436694	0,64256118	$\frac{N}{N_0} = e^{-0.084366 \cdot t}$
0,8	-0,08382805	0,56132662	$\frac{N}{N_0} = e^{-0.083828 \cdot t}$
1	-0,07829113	0,51843537	$\frac{N}{N_0} = e^{-0.078291 \cdot t}$
2	-0,11803569	0,51259103	$\frac{N}{N_0} = e^{-0.118035 \cdot t}$
4	-0,14405046	0,69292326	$\frac{N}{N_0} = e^{-0.144050 \cdot t}$
6	-0,17472948	0,31290612	$\frac{N}{N_0} = e^{-0.174729 \cdot t}$

La regresión obtenida arroja los datos correspondientes a la constante de decaimiento K, para cada dosis realizada, y el valor del coeficiente de determinación R² ajustado¹⁰.

De allí se observa que el mejor valor del coeficiente de determinación R² es el de la dosis de 4 mg/l, con 0.69292326, aunque es un valor muy bajo es el más representativo de esta serie de datos.

*¹⁰ El coeficiente de determinación permite definir el grado de relación que tiene la regresión realizada con la curva en estudio, es decir, la linealización es muy cercana a la curva y la representa, cuando el valor de R2 es igual o muy cercano a 1.

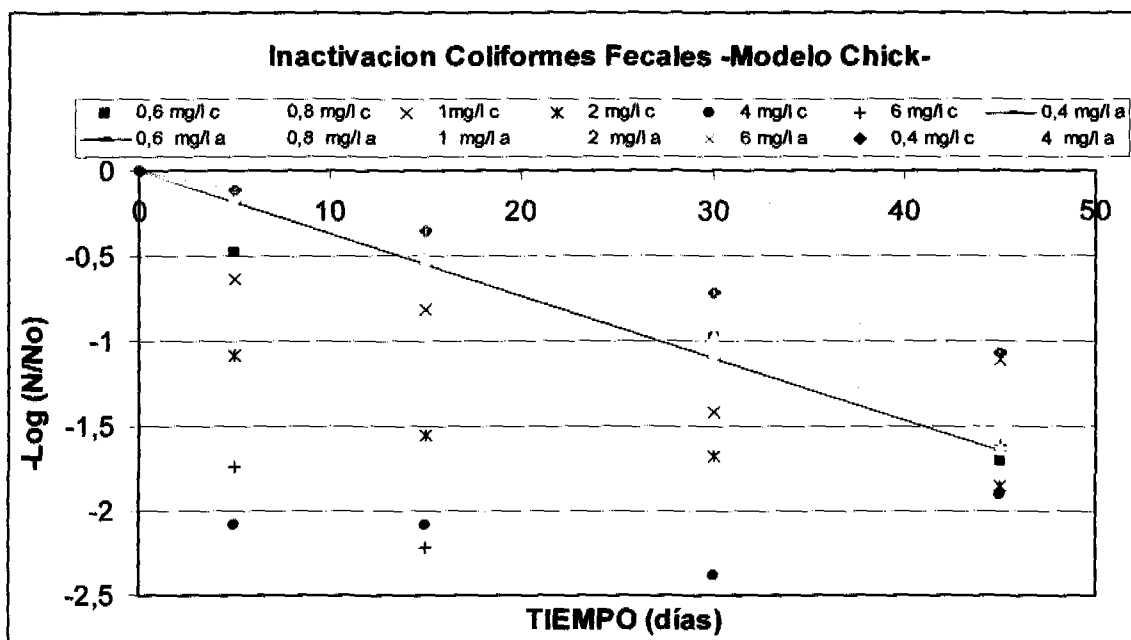
Para conocer la efectividad del proceso respecto a la inactivación del microorganismo indicador, se realizó una gráfica de Log (N/No) respecto al tiempo, como se observa en la tablas 29 y 30, y en la figura 27.

Tabla 29. Valores de Log(N/No) calculados por dosis y tiempos.

Valores Obtenidos Calculados							
Log (N/No)							
	0,4 mg/l	0,6 mg/l	0,8 mg/l	1mg/l	2 mg/l	4 mg/l	6 mg/l
0	0	0	0	0	0	0	0
5	-0,544068	-0,477121	-0,75696195	-0,6368221	-1,07918125	-2,07918125	-1,73772259
15	-0,447158	-0,512594	-0,91781324	-0,81291336	-1,5563025	-2,07918125	-2,21484385
30	-1,036984	-0,980571	-0,96523789	-1,41497335	-1,68124124	-2,38021124	-
45	-0,787106	-1,70757	-1,5351132	-1,11394335	-1,8573325	-1,90308999	-1,61278386

Tabla 30. Valores de Log(N/No) ajustados por dosis y tiempos, según Modelo de Chick

LEY DE CHICK							
-Log (N/No)							
TIEMPO	0,4 mg/l	0,6 mg/l	0,8 mg/l	1mg/l	2 mg/l	4 mg/l	6 mg/l
0	0	0	0	0	0	0	0
5	-0,119617	-0,1832	-0,18203	-0,170007	-0,119617	-0,11961731	-0,11961731
15	-0,358852	-0,549601	-0,546091	-0,510021	-0,358852	-0,35885193	-0,35885193
30	-0,717704	-1,099203	-1,092182	-1,020042	-0,717704	-0,71770386	-0,71770386
45	-1,076556	-1,648804	-1,638273	-1,530063	-1,076556	-1,07655579	-1,07655579



En la figura 27, se observa con claridad la dispersión de los datos iniciales respecto los valores ajustados por regresión, lo que permite deducir que éste modelo no es representativo para el comportamiento del sistema planteado.

b) Modelo de Watson

Esta ley permite realizar un análisis similar a la Ley de Chick, pero teniendo en cuenta la constante de decaimiento, la concentración adicionada y un coeficiente n. Estos valores representados por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{dN}{dt} = -K * C^n * N_0$$

Ecuación 7

Donde:

No= Concentración de microorganismos inicial (UFC/100 ml)

K = Constante de decaimiento (1/T)

C = Concentración del desinfectante NaOCl (mg/l)

N = Coeficiente

Que equivale a la siguiente expresión:

$$\ln \left[- \ln \left(\frac{N}{N_0} \right) \right] - \ln t = \ln K + n \ln C \quad \text{Ecuación 8}$$

Entonces se realizó la respectiva regresión de los datos para obtener las constantes, y el valor de n para cada dosis, obteniendo la tabla 31.

Tabla 31. Resultados regresión para obtener las variables del Modelo de Watson

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,458960625
Coefficiente de determinación R ²	0,210644855
R ² ajustado	0,180285042
Error típico	0,723724717
Observaciones	28
k= e Ln K	0,129472729
Coefficientes	
Intercepción	-2,044285009
Variable X 1	0,395813924
Ecuación	$\frac{N}{N_0} = e^{-k \cdot C^n \cdot t}$
Ecuación	$\frac{N}{N_0} = e^{-0.12947 \cdot C^{0.39548} \cdot t}$

Se obtuvo para este modelo un coeficiente bastante bajo, lo que permitiría deducir en primera medida que no corresponde al comportamiento del estudio realizado.

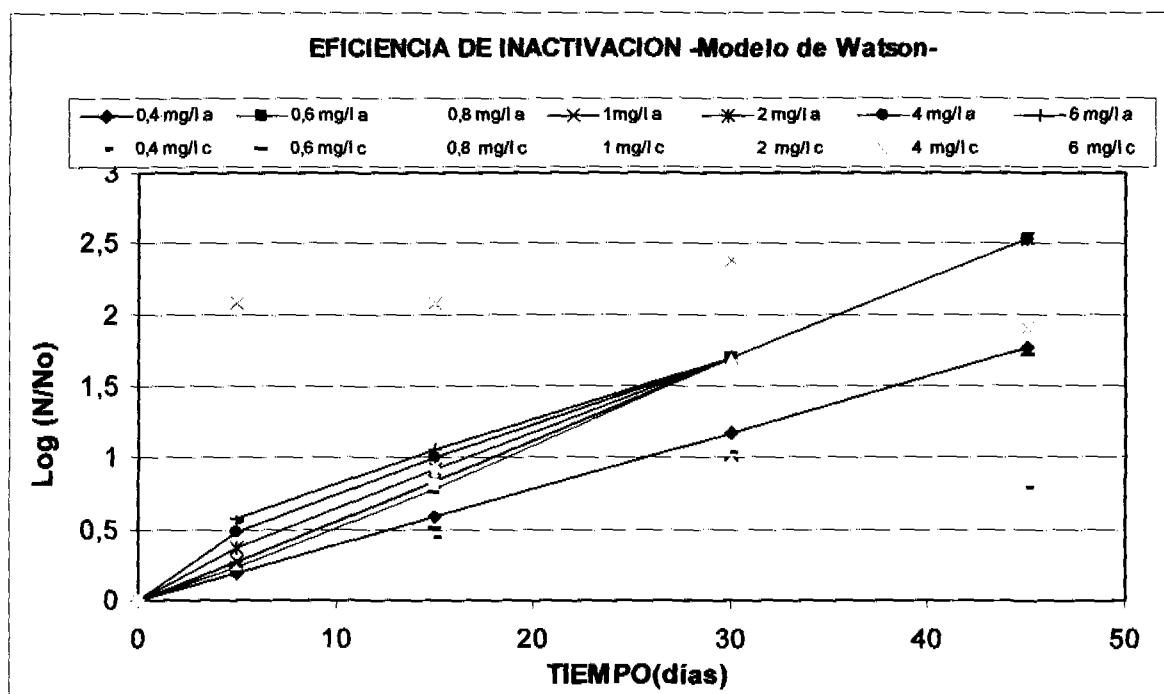
Para observar la eficiencia de este modelo, se realizó la gráfica con la ecuación ajustada, para cada dosis y cada tiempo, resultando la tabla 12 y la figura 24.

Tabla 32. Valores de Log(N/No) calculados por dosis y tiempos

Valores Obtenidos Calculados							
Log (N/No)							
TIEMPO	0,4 mg/l	0,6 mg/l	0,8 mg/l	1mg/l	2 mg/l	4 mg/l	6 mg/l
0	0	0	0	0	0	0	0
5	-0,544068	-0,477121	-0,75696195	-0,6368221	-1,07918125	-2,07918125	-1,73772259
15	-0,447158	-0,512594	-0,91781324	-0,81291336	-1,5563025	-2,07918125	-2,21484385
30	-1,036984	-0,980571	-0,96523789	-1,41497335	-1,68124124	-2,38021124	-
45	-0,787106	-1,70757	-1,5351132	-1,11394335	-1,8573325	-1,90308999	-1,61278386

Tabla 33. Valores de Log(N/No) ajustados por dosis y tiempos, según Modelo de Watson

MODELO DE WATSON							
Log (N/No)							
TIEMPO	0,4 mg/l	0,6 mg/l	0,8 mg/l	1mg/l	2 mg/l	4 mg/l	6 mg/l
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2,506547	2,35233	2,2487	2,171472	1,948094	1,747694	1,640165
15	7,519642	7,056989	6,746099	6,514417	5,844281	5,243081	4,920496
30	15,03928	14,11398	13,4922	13,02883	11,68856	10,48616	9,840991
45	22,55893	21,17097	20,2383	19,54325	17,53284	15,72924	14,76149



La figura 28 muestra la linealización ajustada para el Modelo de Watson y se observa de igual manera una dispersión de los datos iniciales, por lo que no es posible elegir éste modelo como el relacionado con el comportamiento del sistema.

c) Modelo de Hom

Otro método para analizar la efectividad de la inactivación de microorganismos, es por medio del Modelo de Hom, que tiene adicionalmente otras variables de estudio, representado en la siguiente ecuación:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{-KC^n t^m}{m}$$

Ecuación 9

Donde:

No= Concentración de microorganismos inicial (UFC/100 ml)

K = Constante de decaimiento (1/T)

C = Concentración del desinfectante NaOCl (mg/l)

N y m =coeficientes.

Despejando se obtiene:

$$\ln\left(-\ln\frac{N}{No}\right) = \ln K + n\ln C + mLnt \quad \text{Ecuación 10}$$

Realizando la regresión de estos datos por medio del análisis de datos que realiza el programa Microsoft Excel 2003, se obtuvieron los coeficientes n y m que corresponden a las variables X1 y X2 en la regresión, como se puede ver en la tabla 34.

Tabla 34. Regresión para obtener las variables del modelo de Hom

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,974506978
Coeficiente de determinación R^2	0,949663851
R^2 ajustado	0,907650405
Error típico	0,249775201
Coeficientes	
Intercepción = LnK	0
Variable X 1 = n	0,423386867
Variable X 2 = m	0,290978165
k= e^{intercepcion}	
1	
Ecuación	$\frac{N}{No} = e^{-K \cdot C^n \cdot t^m}$
Ecuación	$\frac{N}{No} = e^{-K \cdot C^{0,423} \cdot t^{0,290}}$

En esta tabla se puede observar que el coeficiente de correlación es 0.907650405 lo que permite deducir que es la regresión que mejor se ajusta a los datos obtenidos.

Luego, para hallar la eficiencia de inactivación se realizó de igual manera la gráfica de $\text{Log}(N/N_0)$ para observar dicha eficiencia.

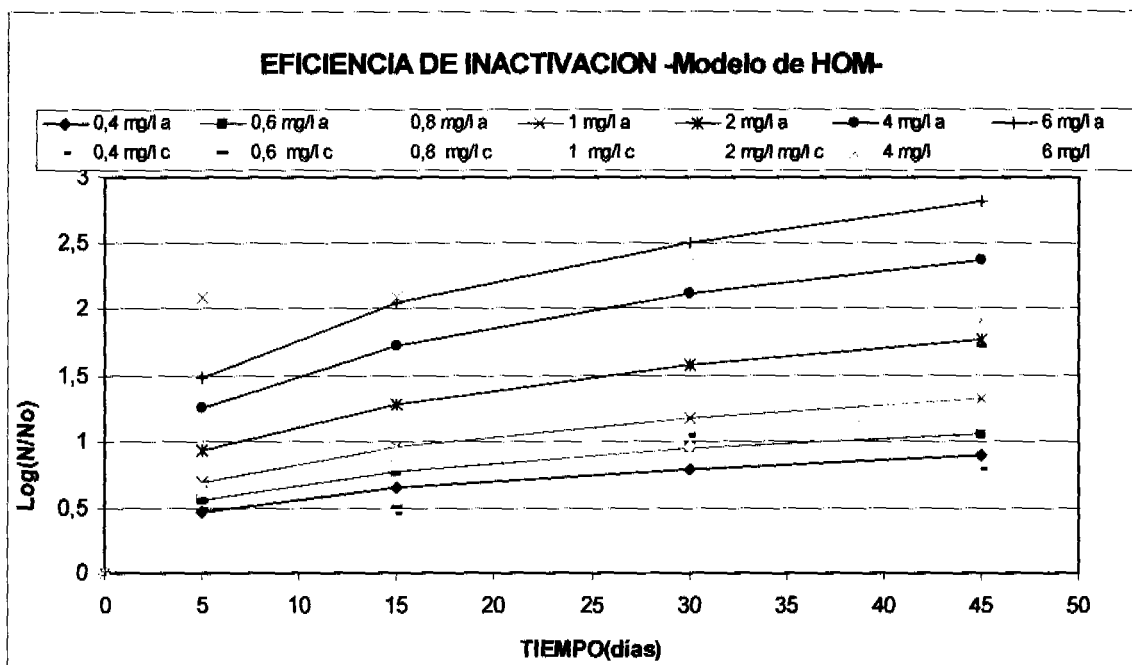
Tabla 35. Valores de $\text{Log}(N/N_0)$ calculados por dosis y tiempos.

Valores Obtenidos Calculados							
Log (N/No)							
TIEMPO (min)	0,4 mg/l	0,6 mg/l	0,8 mg/l	1mg/l	2 mg/l	4 mg/l	6 mg/l
0	0	0	0	0	0	0	0
5	-0,544068	-0,477121	-0,75696195	-0,6368221	-1,07918125	-2,07918125	-1,73772259
15	-0,447158	-0,512594	-0,91781324	-0,81291336	-1,5563025	-2,07918125	-2,21484385
30	-1,036984	-0,980571	-0,96523789	-1,41497335	-1,68124124	-2,38021124	-
45	-0,787106	-1,70757	-1,5351132	-1,11394335	-1,8573325	-1,90308999	-1,61278386

Tabla 36. Valores de $\text{Log}(N/N_0)$ ajustados para el modelo de Hom

MODELO DE HOM –Ajustados–							
Log (N/No)							
TIEMPO (min)	0,4 mg/l	0,6 mg/l	0,8 mg/l	1mg/l	2 mg/l	4 mg/l	6 mg/l
0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,47064	0,558781	0,631159	0,693696	0,930297	1,247595	1,48125
15	0,64792	0,76926	0,868902	0,954995	1,280717	1,717535	2,039202
30	0,79271	0,941167	1,063075	1,168408	1,566919	2,101351	2,494901
45	0,89197	1,059023	1,196197	1,314719	1,763134	2,364489	2,807321

Figura 29. Gráfica de $\text{Log}(N/N_0)$ en función del tiempo para datos calculados y datos ajustados, según Modelo de Hom.



La gráfica 29 representa los valores iniciales y las curvas ajustadas por el Modelo de Hom, permitiendo observar la relación y correspondencia eficiente de éste modelo para el comportamiento del sistema.

De tal manera, se puede considerar que éste modelo al tener en cuenta la constante de decaimiento, la concentración de desinfectante aplicada, el tiempo de contacto y otros coeficientes, representa de manera muy cercana el comportamiento que tuvo el agua residual al contacto con el Hipoclorito de Sodio.

Respecto al comportamiento del tiempo, se encontró que a mayor tiempo de contacto, la eficiencia de remoción crece de igual manera según los datos obtenidos.

contacto ocurren entre los 30 y 45 minutos, percibiendo entonces que el hipoclorito alcanza a adaptarse en la mezcla en un tiempo mayor a 15 minutos para realizar la inactivación.

Para determinar el valor de la eficiencia de inactivación de los coliformes fecales, se tiene en cuenta una correspondencia teórica conocida, en la que se le asigna el 100% de eficiencia al valor de 4Log , es decir, los valores del logaritmo en base 10 de el cociente (N/No) cercanos a 4 o a -4, serán los de mayor eficiencia. Según los datos obtenidos, el mayor valor fue 2.807Log , lo que representa una eficiencia óptima en la inactivación.

El Modelo de Hom representa el comportamiento del trabajo realizado y tiene en cuenta además las variables que intervinieron en él, es decir, si el desarrollo del trabajo presentó algún tipo de variación o desviación, el modelo se ajustará igualmente a ese comportamiento. Si se desean conocer eficiencias para dosis o tiempos de contacto no ensayados, es posible utilizar el planteamiento desarrollado por Hom.

Para detallar con mayor cuidado el valor de la eficiencia de inactivación, se muestra en la tabla 39 el cálculo de los principales porcentajes de inactivación teóricos, y a partir de los cuales se hallaron los correspondientes a los datos obtenidos.

Tabla 37. Valores de eficiencia para cada dosis y tiempo de contacto.

N/No	1/10	1/100	1/1000	1/10000
N/No	0,1	0,01	0,001	0,0001
$\text{Log}(N/\text{No})$	-1	-2	-3	-4
$1 - \text{Log}(N/\text{No})$	0,9	0,99	0,999	0,9999
Porcentaje	90%	99%	99,9%	99,99%

Tabla 38. Cálculo eficiencias para el Modelo de Horn

EFICIENCIAS DE REMOCION							
TIEMPO	0,4 mg/l	0,6 mg/l	0,8 mg/l	1mg/l	2 mg/l	4 mg/l	6 mg/l
5	41,96%	37,94%	53,09%	47,10%	66,01%	87,50%	82,41%
15	36,06%	40,11%	60,06%	55,64%	78,91%	87,50%	89,08%
30	64,55%	62,49%	61,91%	75,71%	81,39%	90,75%	0,00%
45	54,48%	81,87%	78,46%	67,17%	84,39%	85,09%	80,07%

Aunque se observa que a mayor tiempo de contacto y a mayor dosis de desinfectante, el porcentaje de eficiencia aumenta, debe tenerse en cuenta el uso del agua tratada obtenida en este sistema, para evitar problemas respecto a los subproductos generados o a los requerimientos necesarios para un reuso específico.

Adicionalmente la figura muestra que la eficiencia de inactivación aumenta de igual manera para cada una de las dosis y ningún valor es igual a otro, es decir, cada dosis y cada tiempo tiene un resultado distinto.

Finalmente para el modelo de Horn, se eligió el mejor comportamiento para los valores obtenidos en la dosis correspondiente a 4 mg/l de NaOCl en un tiempo de contacto de 30 minutos, por ser el valor más cercano a la curva ajustada según modelo

4.3.3. Fase de Reuso

Teniendo en cuenta que las principales características para determinar la calidad del agua de riego son: la cantidad total de sales solubles existentes, la cantidad o concentración de sodio y la concentración de sustancias tóxicas, se analizaron los datos obtenidos con los tratamientos físico-químico y biológico para poder considerar la opción de reusar el agua en una actividad específica como el riego de cultivos.

En primera medida se tuvo en cuenta la conductividad eléctrica como el valor más importante para determinar el grado de salinidad del agua a reusar, por lo que se realizó la respectiva correlación de las unidades de conductividad a contenido total de sales.

Entonces, el contenido total de sales en partes por millón (p.p.m.) o mg/l se obtiene multiplicando por 0.64 la conductividad eléctrica en ms/cm, de tal manera:

Tabla 39. Valores tabla conversión de Conductividad Eléctrica a contenido de sales

	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA				
	µsiemens/cm				
DOSIS	AFLUENTE	NaOCl (5 min)	NaOCl (15 min)	NaOCl (30 min)	NaOCl (45 min)
1 mg/l	509,2	539,6	520,6	547,2	539,6
2 mg/l	391,4	402,8	448,4	501,6	433,2
4 mg/l	433,2	433,3	463,6	513	520,6
6 mg/l	532	543,4	558,6	547,2	551
8 mg/l	600,4	608	614,9	615,6	612,6
	CONTENIDO SALES				
	mg/l				
DOSIS	AFLUENTE	NaOCl (5 min)	NaOCl (15 min)	NaOCl (30 min)	NaOCl (45 min)
1 mg/l	325,888	345,344	333,184	350,208	345,344
2 mg/l	250,496	257,792	286,976	321,024	277,248
4 mg/l	277,248	277,312	296,704	328,32	333,184
6 mg/l	340,48	347,776	357,504	350,208	352,64
8 mg/l	384,256	389,12	393,536	393,984	392,064

Normalmente se consideran aguas de poca salinidad las de una conductividad eléctrica menor de 750 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y salinas las de valores superiores, aunque en algunos cultivos se puede utilizar sin problemas aguas hasta de 1500 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

Por lo tanto el agua resultante de éste estudio está clasificada como agua de poca salinidad. Sin embargo debe analizarse cuidadosamente el contenido de sales en un cultivo específico.

Al regar con agua salina, se aportan sales que al no ser absorbidas por las plantas, aumentan inevitablemente la cantidad existente en el suelo que se va salinizando progresivamente. Las plantas son tolerantes durante la germinación, pero muy sensibles en la etapa de crecimiento. Son más sensibles si el clima es cálido, es decir, la tolerancia aumenta a medida que el tiempo es más frío y húmedo. De acuerdo al tipo de especie se tendrán mayores o menores tolerancias, prefiriendo entonces las más tolerantes si se va a utilizar agua salina.

Todo esto apunta que aguas con altos valores de conductividad podría disminuir el rendimiento de algunos cultivos, pero todo depende de las condiciones del tipo de suelo, los aportes de agua realizados, la frecuencia del riego, el clima predominante, el tipo de especie, etc. Pero en ningún caso se descarta la posibilidad de usar aguas salinas para riego de cultivos, como la obtenida en el transcurso de éste estudio.

La reutilización del agua tratada puede alcanzar diversos niveles, la destinada para consumo humano necesita unos tratamientos terciarios muy complejos, en cambio el reciclado para riego solo necesita tratamiento secundario, con el consiguiente ahorro, ya que no requiere tanta calidad como en el caso de consumo directo. Se permiten cantidades controladas como fertilizantes y oligoelementos, ya que pueden ser de gran beneficio para el cultivo.

Una recomendación muy importante es que el agua a reutilizar no debe presentar bacteria ni virus patógenos, lo cual se cumple a satisfacción luego del tratamiento químico aplicado. Por otro lado, el contenido de sales debe ser conocido para evitar excesos de iones o salinidad que puedan disminuir la producción de los cultivos.

Teniendo en cuenta las condiciones nacionales e internacionales, existen parámetros o valores guía para determinar la calidad necesaria del agua residual destinada al riego de cultivos, lo que permite dar una aproximación de la capacidad de reuso del agua tratada en ésta investigación.

Tabla 40. Comparación valores guía con valores obtenidos.

NORMA	PARAMETRO	UNIDAD	VALOR GUIA	VALOR AGUA TRATADA	OBSERVACIONES
Decreto 1594	pH	Unidades pH	4,5 - 9	7,03 - 8,15	Cumple
Guías EPA (Uso Agrícola 1, para alimentos procesados)	pH	Unidades pH	6 - 9	7,03 - 8,15	Cumple
	Cloro Residual	mg/l	1	2.1	No cumple
Guías EPA (Uso Agrícola 2, para alimentos no procesados)	Cloro Residual	mg/l	1	2.1	No cumple

Existen otros valores guía para evaluar la calidad del agua de uso en agricultura, pero no estuvieron dentro del alcance de este trabajo.

Hay que tener en cuenta que el reuso de agua puede afectar o beneficiar directamente tanto al cultivo como tal, como a los trabajadores de dichos cultivos por contacto directo. Por lo tanto se den elegir minuciosamente las especies más aptas y menos sensibles para recibir el agua residual tratada, y en cuanto a los trabajadores, estos pueden desarrollar un plan de seguridad por medio de implementaos de trabajo aptos para evitar el contacto con el agua.

CONCLUSIONES

El sistema Pozo Séptico, Humedal Artificial de flujo vertical y Oxidación química es un tratamiento eficiente para la reducción de contaminantes presentes en un agua residual.

El sistema operó de manera eficiente durante el tiempo de operación estudiado, con variaciones únicamente hacia los 75 días de trabajo.

La aplicación de Hipoclorito de Sodio para oxidar un agua residual, se realiza de manera fácil y sencilla, pero siempre se debe tener en cuenta la técnica de trabajo, la medición de tiempo y el control de los factores externos.

El comportamiento del Humedal Artificial fue óptimo, teniendo en cuenta los procesos realizados gracias al lecho filtrante y al efecto de las plantas emergentes dentro del mismo.

Los datos obtenidos en general muestran el comportamiento del tratamiento a lo largo del sistema (físico-biológico y químico) según los supuestos planteados iniciales, es decir, se obtuvieron los datos de remoción esperados y se pudo de tal manera estudiar dicho comportamiento.

El mejor comportamiento para los valores obtenidos corresponde a la dosis de 4 mg/l de NaOCl en un tiempo de contacto de 30 minutos, por ser el valor más cercano a la curva ajustada según el Modelo de Hom.

El agua tratada obtenida cumple efectivamente la inactivación del organismo indicador Coliformes Fecales, permitiendo su utilización en el riego de cierto tipo de cultivo por contener concentraciones muy bajas de microorganismos.

Los datos obtenidos en general muestran el comportamiento del tratamiento a lo largo del sistema (físico-biológico y químico) según los supuestos planteados iniciales, es decir, se obtuvieron los datos de remoción esperados y se pudo de tal manera estudiar dicho comportamiento.

El mejor comportamiento para los valores obtenidos corresponde a la dosis de 4 mg/l de NaOCl en un tiempo de contacto de 30 minutos, por ser el valor más cercano a la curva ajustada según el Modelo de Hom.

El reuso de aguas residuales tratadas debe contar como mínimo con el estudio de la concentración de sales solubles, concentración de sodio y concentración de sustancias tóxicas.

El agua tratada obtenida cumple efectivamente la inactivación del organismo indicador Coliformes Fecales, permitiendo su utilización en el riego de cierto tipo de cultivo por contener concentraciones muy bajas de microorganismos.

Por medio de la conductividad eléctrica se determinó que el agua tratada corresponde a un agua de baja salinidad, lo cual permite deducir que las afecciones por riego a los cultivos, ya sea a las hojas de las plantas directamente, o al suelo como tal, pueden ser mínimas, pero además puede ser un agua rica en elementos beneficiosos para el desarrollo de ciertas especies.

El uso que se le de al agua tratada puede elegirse según el tipo de especies disponibles, ya sea para riego de cultivos especiales o para riego de zonas verdes y campos abiertos.

La caracterización final del sistema permite elegir con claridad el reuso mas apto, de acuerdo con las condiciones de soporte de las especies, frecuencia del riego, y condiciones climáticas.

El tratamiento por medio de la aplicación de un oxidante químico puede ser mejorado según las condiciones iniciales del agua a tratar.

RECOMENDACIONES

La obtención de datos de tipo experimental, para evaluar el desarrollo del sistema de tratamiento, debe realizarse de acuerdo con los parámetros mínimos de realización de ensayos y con las condiciones pertinentes para encontrar confiabilidad en los mismos, por esta razón es recomendable tener un manejo adecuado de datos poder obtener resultados confiables.

Se recomienda para futuras investigaciones seleccionar y determinar un tiempo mayor de estabilización del sistema de tratamiento entre la variación orgánica, para permitirle al sistema y a la vegetación adaptarse y comportarse de la manera más óptima.

Otro factor es lograr controlar o manejar los factores externos que podrían modificar el comportamiento del Humedal Artificial como cambios climáticos severos, como vientos o lluvias, para evitar la saturación del lecho o el deterioro de las plantas emergentes.

Es aconsejable que para futuras aplicaciones del oxidante químico se pudiera mejorar según las condiciones iniciales del agua para su tratamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARBOLEDA VALENCIA, Manuel. Teoría y práctica de la purificación del agua. 3 ed. Bogotá, Colombia: s.n., 2000. 250 p.

BRIX, Hans. Use of Constructed Wetlands in Water Pollution Control: Historical Development, Present Status, and Future Perspectives. En: Water Science Technology. Vol .30, Nº 8, 1995; p. 209-223

_____. ARIAS, Carlos A.. Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas residuales. En: Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Nº 13, p. 17-24

_____. JOHANSEN, Niels-Henrik. Experiments in a two- stage Constructed Wetland System: Nitrification Capacity and Effects of Recycling on Nitrogen Removal. En: Wetlands: nutrients, metals, and mass cycling. 2003. p. 237-258.

CASTAÑÓN, Guillermo. Ingeniería del Riego: Utilización Racional del Agua. España: Thompson Learning, 2000. 197 p.

EL AGUA SUCIA PUEDE SER REUSADA: Los desechos humanos, las aguas residuales y las excretas se pueden utilizar. En el Valle del Cauca hay un proyecto de tratamiento de aguas residuales para cultivos de caña. En: Periódico Institucional de la Universidad del valle –Agencia universitaria de Periodismo Científico-(Julio/2003), p. 1-3.

HIGUITA BERNAL, Faisal, MAURY ARDILA, Henry, MURIEL MOSQUERA, Diana, Investigaciones Corporación Universitaria de la Costa: Humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales. En: Publi-Reportaje – Gente Caribe – El Heraldo, Edición 401, 2004.

METCALF & EDDY, Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización, 3ª edición, Editorial McGraw-Hill., 1998. 837 p.

MOURA DE SOUZA, Alex Avaliação do Emprego da Radiação Ultravioleta Na Desinfecção de Águas Com Turbidez e Cor Moderadas, Vol. 7 - Nº 1 - jan/mar 2002 e Nº 2 - abr/jun 2002 engenharia sanitária e ambiental.

PROSAB (Red Cooperativa de Investigaciones en Saneamiento Básico), GONÇALVES FRANCI, Ricardo. Desinfecção de Efluentes Sanitários, Remoção de Organismos Patógenos e Substancias Nocivas. Aplicações Para Fins Productivos Como Agricultura, Aqüicultura e Hidropônica. 2003

RODRIGUEZ, Tatiana. OSPINA; Ivonne. Humedales Artificiales de Flujo Vertical para Mejorar la Calidad del Agua del Río Bogota. En: Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina. N°15. Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada. 2005

SEOAENZ, Mariano. Aguas residuales: Tratamiento por Humedales Artificiales. Fundamentos Científicos. Tecnologías. Diseño. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, 1999.

TCHOBANOGLOUS, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización, tomo I, editorial McGraw-Hill, Madrid 1995. 420 p.

APÉNDICE

A continuación se anexan los formatos respectivos del control de actividades desarrolladas a lo largo de este trabajo, compuestos por la lista de actividades de recopilación de información, realización del informe escrito, seguimiento de las prácticas de laboratorio, y descripción de las actividades de trabajos de campo.

FORMATO CONTROL DE ACTIVIDADES

FORMATO PARA CONTROL DE ACTIVIDADES**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA****FACULTAD DE INGENIERIA****PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL****GRUPO DE INVESTIGACION:** G.I.I.S**OPCION DE GRADO:** AUXILIAR DE INVESTIGACION**NOMBRE DEL PROYECTO:** OXIDACION DEL EFLUENTE DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL PARA REUSO EN AGRICULTURA**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** CATALINA MORALES RODRIGUEZ**NOMBRE DEL INVESTIGADOR/ TUTOR:** ING. TATIANA RODRIGUEZ / ING. DIANA CRISTANCHO

ACTIVIDAD	FECHA	Nº DE DIAS	Nº DE HORAS	LUGAR	OBSERVACIONES	FIRMA
Ensayos de Laboratorio FASE I	Mar-17	6	3,5	Laboratorio Calidad de Aguas	Reconocimiento de los ensayos y del equipo necesario bajo supervision del laboratorista y del tutor.	
Ensayos de Laboratorio FASE I	Mar-24		3,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE I	Mar-31		6,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE I	Abr-03		6,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE I	Abr-21		6,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE I	Abr-24		4,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Extracción de plantas y replanteo en Humedal UMNG	Abr-28	1	4,0	Humedal Santa Mª del Lago	Se realizó la toma normalmente.	
Ensayos de Laboratorio FASE I	Abr-28	5	4,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE I	May-03		3,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE I	May-04		2,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE I	Jun-08		5,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE I	Jun-09		4,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Consulta información páginas Web	May-30	4	4,0	Sala de Internet UMNG		
Consulta información páginas Web	May-31		4,0	Sala de Internet UMNG		
Consulta información páginas Web	Jun-01		4,0	Sala de Internet UMNG		
Consulta información páginas Web	Jun-02		4,0	Sala de Internet UMNG		
Consulta de Libros	Jun-05	5	4,0	Biblioteca UMNG		
Consulta de Libros	Jun-06		4,0	Biblioteca UMNG		
Consulta de Libros	Jun-07		4,0	Biblioteca UMNG		
Consulta de Libros	Jun-08		4,0	Biblioteca UMNG		
Consulta de Libros	Jun-09		4,0	Biblioteca UMNG		

FORMATO PARA CONTROL DE ACTIVIDADES

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

GRUPO DE INVESTIGACION: G.I.I.S

OPCION DE GRADO: AUXILIAR DE INVESTIGACION

NOMBRE DEL PROYECTO: OXIDACION DEL EFLUENTE DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL PARA REUSO EN AGRICULTURA

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: CATALINA MORALES RODRIGUEZ

NOMBRE DEL INVESTIGADOR/ TUTOR: ING. TATIANA RODRIGUEZ / ING. DIANA CRISTANCHO

ACTIVIDAD	FECHA	Nº DE DIAS	Nº DE HORAS	LUGAR	OBSERVACIONES	FIRMA
Consulta de Libros	Jun-12	5	6,0	Biblioteca Luis Angel Arango		
Consulta de Libros	Jun-13		6,0	Biblioteca Luis Angel Arango		
Consulta de Libros	Jun-14		6,0	Biblioteca Luis Angel Arango		
Consulta de Libros	Jun-15		6,0	Biblioteca Luis Angel Arango		
Consulta de Libros	Jun-16		6,0	Biblioteca Luis Angel Arango		
Realización Propuesta de Grado	Jul-17	10	3,0	Computador personal	La propuesta se realiza teniendo en cuenta los requerimientos para la opción de Aux. de Investigación, especificados por el Comité de Opción de Grado.	
Realización Propuesta de Grado	Jul-18		3,0	Computador personal		
Realización Propuesta de Grado	Jul-19		3,0	Computador personal		
Realización Propuesta de Grado	Jul-20		3,0	Computador personal		
Realización Propuesta de Grado	Jul-21		3,0	Computador personal		
Realización Propuesta de Grado	Jul-24		3,0	Computador personal		
Realización Propuesta de Grado	Jul-25		3,0	Computador personal		
Realización Propuesta de Grado	Jul-26		3,0	Computador personal		
Realización Propuesta de Grado	Jul-27		3,0	Computador personal		
Realización Propuesta de Grado	Jul-28		3,0	Computador personal		
Revisión Propuesta Director	Jul-31	2	2,0	Via Internet		
Revisión Propuesta Director	Ago-01		2,0	Via Internet		
Revisión Propuesta Tutor	Ago-02	2	2,0	Universidad Militar Nueva Granada		
Revisión Propuesta Tutor	Ago-03		2,0	Universidad Militar Nueva Granada		
Revisión Propuesta Docente del Área	Ago-04	1	2,0	Universidad Militar Nueva Granada		

FORMATO PARA CONTROL DE ACTIVIDADES**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA****FACULTAD DE INGENIERIA****PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL****GRUPO DE INVESTIGACION:** G.I.I.S**OPCION DE GRADO:** AUXILIAR DE INVESTIGACION**NOMBRE DEL PROYECTO:** OXIDACION DEL EFLUENTE DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL PARA REUSO EN AGRICULTURA**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** CATALINA MORALES RODRIGUEZ**NOMBRE DEL INVESTIGADOR/ TUTOR:** ING. TATIANA RODRIGUEZ / ING. DIANA CRISTANCHO

ACTIVIDAD	FECHA	N° DE DIAS	N° DE HORAS	LUG	OBSERVACIONES	FIRMA
Corrección Propuesta de Grado	Ago-08	3	2,0	Computador Personal		
Corrección Propuesta de Grado	Ago-09		2,0	Computador Personal		
Corrección Propuesta de Grado	Ago-10		2,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Ago-11	3	4,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Ago-14		4,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Ago-15		4,0	Computador Personal		
Extracción de plantas y replanteo en Humedal UMNG	Ago-16	1	2,0	Humedal Santa Mª del Lago	No se pudo realizar la toma debido a que no había personal de mantenimiento presente para la extracción de las plantas, y dada su dificultad por el nivel de agua encontrado.	
Lectura artículos Científicos	Ago-17	7	4,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Ago-18		4,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Ago-22		4,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Ago-23		4,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Ago-24		4,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Ago-25		4,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Ago-28		4,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Ago-29	4	4,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Ago-30		4,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Ago-31		4,0	Computador Personal		
Lectura artículos Científicos	Sep-01		4,0	Computador Personal		

FORMATO PARA CONTROL DE ACTIVIDADES

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

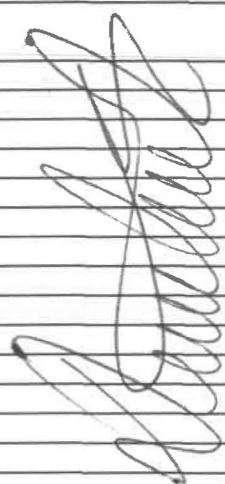
GRUPO DE INVESTIGACION: G.I.I.S

OPCION DE GRADO: AUXILIAR DE INVESTIGACION

NOMBRE DEL PROYECTO: OXIDACION DEL EFLUENTE DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL PARA REUSO EN AGRICULTURA

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: CATALINA MORALES RODRIGUEZ

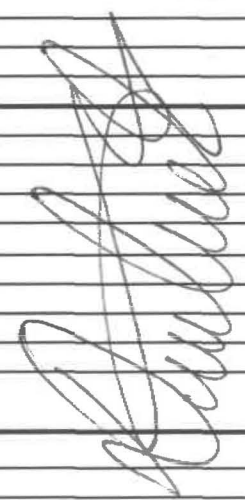
NOMBRE DEL INVESTIGADOR/ TUTOR: ING. TATIANA RODRIGUEZ / ING. DIANA CRISTANCHO

ACTIVIDAD	FECHA	N° DE DIAS	N° DE HORAS	LUGAR	OBSERVACIONES	FIRMA
Extracción de plantas y replanteo en Humedal UMNG	Sep-18	1	3,0	Humedal Santa Mª del Lago	Se realizó la toma normalmente.	
Terminación de semestre y parciales finales	-	-	-	-	-	
Extracción de plantas y replanteo en Humedal UMNG	Nov-24	1	3,0	Humedal Santa Mª del Lago	Se realizó la toma normalmente.	
Ensayos de Laboratorio FASE II	Nov-27	9	5,5	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE II	Nov-28		4,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE II	Nov-29		2,5	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE II	Nov-30		2,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE II	Dic-01		4,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE II	Dic-04		4,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE II	Dic-05		4,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE II	Dic-06		3,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Ensayos de Laboratorio FASE II	Dic-07		4,0	Laboratorio Calidad de Aguas		
Realizacion informe preliminar	Ene-02	5	3,0	Computador presonal		
Realizacion informe preliminar	Ene-03		3,0	Computador presonal		
Realizacion informe preliminar	Ene-04		3,0	Computador presonal		
Realizacion informe preliminar	Ene-05		3,0	Computador presonal		
Realizacion informe preliminar	Ene-09		3,0	Computador presonal		
Revisión Informe Preliminar	Ene-02	2	2	Via Internet	Revisión por parte del tutor	
Revisión Informe Preliminar	Ene-03		2	Via Internet	Revisión por parte del director	

FORMATO CONTROL DE ACTIVIDADES DE LABORATORIO

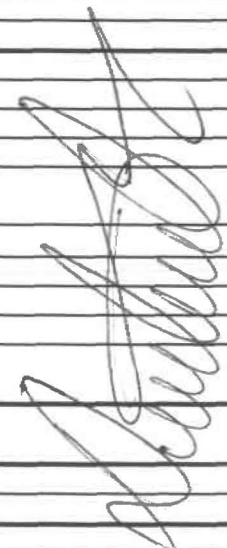
FORMATO PARA CONTROL DE ACTIVIDADES EN LABORATORIO	
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA	
FACULTAD DE INGENIERIA	
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL	

GRUPO DE INVESTIGACION:	G.I.I.S
OPCION DE GRADO:	AUXILIAR DE INVESTIGACION
NOMBRE DEL PROYECTO:	OXIDACION DEL EFLUENTE DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL PARA REUSO EN AGRICULTURA
NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CATALINA MORALES RODRIGUEZ
NOMBRE DEL INVESTIGADOR/ TUTOR:	ING. TATIANA RODRIGUEZ / ING. DIANA CRISTANCHO

DIA	FECHA	PARAMETRO	NORMA	Nº DE PARAMETROS	HORA DE ENTRADA	HORA DE SALIDA	OBSERVACIONES	FIRMA LABORATORISTA
4	Abr-03	Dureza Total	AWWA 2340C	2	09:00 a.m.	03:00 p.m.		
		Dureza por Calcio	AWWA 2340C	2				
		Nitritos	Kit de Merck	3				
		Nitratos	Kit de Merck	3				
		Acidez	AWWA 2310B	2				
		Alcalinidad	AWWA 2320B	2				
5	Abr-21	Acidez	AWWA 2310B	2	09:00 a.m.	03:00 p.m.		
		Alcalinidad	AWWA 2320B	2				
		Dureza por Calcio	AWWA 2340C	2				
		Dureza total	AWWA 2340C	2				
		Cloruros	AWWA 4500 Cl ⁻	2				
		Conductividad	AWWA 2510B	2				
		pH	AWWA 4500-H+	2				
		Temperatura	AWWA 2550	2				
		Turbiedad	AWWA 2130B	2				
6	Abr-24	Fósforo	Método espectofotométrico	2	09:00 a.m.	01:00 p.m.		
		Oxig. Disuelto	AWWA 4500 O ₂	2				
		Sólidos Totales	AWWA 2540B	2				
		Sólidos suspendidos	AWWA 2540B	2				
		Nitritos	Kit de Merck	2				
		Nitratos	Kit de Merck	2				

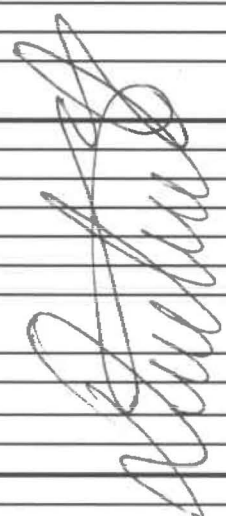
FORMATO PARA CONTROL DE ACTIVIDADES EN LABORATORIO
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

GRUPO DE INVESTIGACION:	G.I.I.S
OPCION DE GRADO:	AUXILIAR DE INVESTIGACION
NOMBRE DEL PROYECTO:	OXIDACION DEL EFLUENTE DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL PARA REUSO EN AGRICULTURA
NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CATALINA MORALES RODRIGUEZ
NOMBRE DEL INVESTIGADOR/ TUTOR:	ING. TATIANA RODRIGUEZ / ING. DIANA CRISTANCHO

DIA	FECHA	PARAMETRO	NORMA	Nº DE PARAMETROS	HORA DE ENTRADA	HORA DE SALIDA	OBSERVACIONES	FIRMA LABORATORISTA
7	Abr-28	DBO 5	AWWA 4500 O ₂	4	11:00am	03:00 p.m.		
		DQO	AWWA 5210B	4				
		Temperatura	AWWA 2550	2				
		pH	AWWA 4500-H+	2				
8	May-03	Dureza Total	AWWA 2340C	2	10:00 a.m.	01:00 p.m.		
		Dureza por Calcio	AWWA 2340C	2				
		Alcalinidad	AWWA2320B	2				
		Acidez	AWWA 2310B	2				
		Fósforo	Método espectofotométrico	2				
		Cloruros	AWWA 4500 Cl ⁻	2				
		Conductividad	AWWA 2510B	2				
		Turbiedad	AWWA 2130B	2				
9	May-04	Nitritos	Kit de Merck	2	10:00 a.m.	12:00 p.m.		
		Coliformes totales	Método. Filtro-membrana	2				
10	Jun-08	Sólidos Totales	AWWA 2540B	4	10:00 a.m.	03:00 p.m.		
		DQO	AWWA 5210B	6				
11	Jun-09	Acidez	AWWA 2310B	2	11:00 a.m.	03:00 p.m.		
		Alcalinidad	AWWA2320B	2				
		Dureza Total	AWWA 2340C	2				
		Dureza por Calcio	AWWA 2340C	2				

FORMATO PARA CONTROL DE ACTIVIDADES EN LABORATORIO	
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA	
FACULTAD DE INGENIERIA	
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL	

GRUPO DE INVESTIGACION:	G.I.I.S
OPCION DE GRADO:	AUXILIAR DE INVESTIGACION
NOMBRE DEL PROYECTO:	OXIDACION DEL EFLUENTE DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO VERTICAL PARA REUSO EN AGRICULTURA
NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CATALINA MORALES RODRIGUEZ
NOMBRE DEL INVESTIGADOR/ TUTOR:	ING. TATIANA RODRIGUEZ / ING. DIANA CRISTANCHO

DIA	FECHA	PARAMETRO	NORMA	Nº DE PARAMETROS	HORA DE ENTRADA	HORA DE SALIDA	OBSERVACIONES	FIRMA LABORATORISTA
11	Jun-09	Cloruros	AWWA 4500 Cl ⁻	2	11:00 a.m.	03:00 p.m.		
		Conductividad	AWWA 2510B	2				
		Turbidez	AWWA 2130B	2				
		Nitritos	Kit de Merck	2				
		Nitratos	Kit de Merck	2				
		Fósforo	Método espectofotométrico	2				
12	Nov-27	pH	AWWA 4500-H ⁺	2	11:00 a.m.	03:00 p.m.	Inicio FASE II	
		Temperatura	AWWA 2550	2				
		Acidez	AWWA 2310B	2				
		Alcalinidad	AWWA 2320B	2				
		Dureza Total	AWWA 2340C	2				
		Dureza por Calcio	AWWA 2340C	2				
		Fósforo	Método espectofotométrico	2				
		DQO	AWWA 5210B	2				
		Cloruros	AWWA 4500 Cl ⁻	2				
		Nitritos	Kit de Merck	2				
		Nitratos	Kit de Merck	2				
13	Nov-28	Sólidos	AWWA 2540B	4	09:00 a.m.	01:00 p.m.		
		Conductividad	AWWA 2510B	2				
		Turbidez	AWWA 2130B	2				
		Coliformes	Método.Filtro-membrana	2				

NOMBRE DEL INVESTIGADOR/ TUTOR:	ING. TATIANA RODRIGUEZ / ING. DIANA CRISTANCHO
---------------------------------	--

[illegible]

